

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Desarrollo y análisis de un modelo por elementos finitos de un utillaje para termoconformado de materiales compuestos



Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

Leire Vigor Olmos

Daniel Salcedo Pérez

Pamplona, octubre del 2020

“Los milagros solo existen
para aquellos que nunca se rinden”

EMPORIO IVANKOV

Gracias a mi tutor, Dani, por toda su ayuda y paciencia para la realización de este trabajo, por ponerme las pilas cuando lo necesitaba y guiarme en todo momento. Sin duda alguna, este proyecto no hubiera sido posible sin su ayuda.

Gracias a mis padres, Javi y Silvia, y a mi hermana, Nerea, por apoyarme siempre y haberme animado a hacer siempre lo que me gusta, por animarme cuando lo necesito y abrirme los ojos cuando me ofusco. Por quererme incondicionalmente y aguantarme en todos mis días malos, por apostar por mí siempre.

Gracias a Fran, por aguantarme hasta en mis peores días, por ayudarme siempre, por tranquilizarme y animarme, por escucharme y apoyarme, por liberarme hasta de mis pensamientos cuando me agobia y sacarme siempre una sonrisa, por quererme a pesar de todo.

Gracias a mis amigos, Jaime y Rubén sobre todo, por ayudarme con mis constantes dudas y ayudarme a desconectar cuando lo necesito, por animarme en mis días malos y sacarme de casa cuando cuando todo se me hace grande.

Gracias a todos los que han marcado mi vida en mi paso por la universidad, a Iñigo, que me adentró en el mundo de la representación e hizo que viviese estos años de una forma tan enriquecedora, y que me ha ayudado en todo lo que he necesitado; a todos los profesores por los que he pasado en estos años, por contagiarme su pasión y por haberme dado parte de su conocimiento; y a todas aquellas personas que hacen todo esto posible.

“La felicidad no es real si no es compartida”, Alexander Supertramp

Abstract

With the growing importance of composite materials in industry, it is becoming increasingly important to find ways to repair possible breaks or cracks. This project aims to determine the areas where such failures are most likely to appear in thermoformed composite parts, which require subsequent repair and refurbishment operations, as well as the influence of the forming of these on the dies.

The knowledge of these failure areas will allow the establishment of design approaches that will reduce the reject rate and increase the use of this material in a larger number of applications than in the present.

The project is based on the development of a tool for thermoforming composite materials and its subsequent analysis by a finite element model of it.

Keywords: composite materials, glassfiber, thermoforming, finite elements, die, tooling.

Resumen

Con la creciente importancia de los materiales compuestos en la industria, se hace cada vez más importante encontrar la forma de reparar posibles roturas o fisuras. A través de este proyecto se pretenden determinar cuáles son las zonas en las que es más probable que aparezcan dichos fallos en piezas de composite termoconformadas, que obligan a operaciones de reparación y saneamiento posteriores, así como la influencia del conformado de las mismas sobre los moldes.

El conocimiento de esas zonas de fallo permitirá establecer las formas de diseño que reducirán el ratio de rechazo y el aumento de utilización de ese material en un mayor número de aplicaciones que las actuales.

El proyecto se basa en el desarrollo de un utillaje para termoconformado de materiales compuestos y su posterior análisis mediante un modelo por elementos finitos del mismo.

Palabras clave: materiales compuestos, fibra de vidrio, termoconformado, elementos finitos, molde, utillaje.

Índice general

Abstract	v
Resumen	v
Índice general	viii
Índice de figuras	xi
1 Introducción	1
1.1 Objetivo	1
1.2 Alcance	2
1.3 Termoconformado	2
1.4 Materiales compuestos	7
1.4.1 Clasificación	9
1.4.2 Materiales compuestos de estudio: composites termoestables re- ciclables, reprocesables, reparables y reutilizables	11
1.5 Criterios de fallo en materiales compuestos	12
1.5.1 Tsai-Wu	13
1.5.2 Hoffman	15
1.5.3 Christensen	17
1.5.4 Hashin	17
1.5.5 Puck	19
2 Normas y referencias	21
2.1 Disposiciones legales y normas aplicadas	21
2.2 Programas de diseño y cálculo	22
3 Desarrollo del utillaje	23
3.1 Parámetros de diseño	23
3.1.1 Descripción de los parámetros de diseño	23
3.1.2 Parámetros de diseño seleccionados	25
3.2 Diseño de los moldes	27
3.3 Ensayos	33
3.3.1 Ensayo del molde en 2D	33

3.3	Ensayos	33
3.3.1	Ensayo del molde en 2D	33
3.3.2	Ensayos del molde en 3D	38
3.3.3	Ensayos de la pieza conformada	55
4	Conclusiones y líneas de futuro	89
5	Anexo A. Planos	91
	Bibliografía	97

Índice de figuras

1.1	Estación de conformado	3
1.2	Enfriamiento de molde	5
1.3	Sistemas de enfriamiento de moldes en termoconformado	6
1.4	Orientación de fibras en composites reforzados por fibras	11
1.5	Superficie de fallo del criterio Tsai-Wu	14
1.6	Plano de rotura material compuesto	18
1.7	Mecanismos de fallo por Puck	20
3.1	Módulo de elasticidad	24
3.2	Módulo de cizalladura	24
3.3	Coefficiente de Poisson	25
3.4	Composición del acero F-522	25
3.5	Ley de endurecimiento del aluminio	26
3.6	Propiedades del material compuesto	27
3.7	Vista modelo 1	28
3.8	Vista modelo 2	28
3.9	Vista modelo 3	29
3.10	Columna guía	30
3.11	Datos de la columna guía	30
3.12	Resistencias calefactadas	32
3.13	Diseño 2D	33
3.14	Malla 2D	34
3.15	Contactos 2D	35
3.16	Fijación molde 2D	35
3.17	Fuerza en molde 2D	35
3.18	Tensiones equivalentes de <i>Von Mises</i> análisis 2D con malla	36
3.19	Tensiones equivalentes de <i>Von Mises</i> análisis 2D sin malla	36
3.20	Gráfica de fuerzas experimentadas	37
3.21	Molde de ensayo	39
3.22	Molde de ensayo en <i>Marc Mentat</i>	39
3.23	Mallado inicial del molde en 3 dimensiones	40
3.24	Malla inicial frontal	40
3.25	Malla inicial superior	40

3.26	Material del molde	41
3.27	Apoyos para el molde en 3D	42
3.28	Valores de fijación	42
3.29	Cargas aplicadas al molde en 3D	43
3.30	Valores de carga	43
3.31	Tensiones de <i>Von Mises</i> con mallado inicial	44
3.32	Tensiones de <i>Von Mises</i> sin visualización de mallado inicial	45
3.33	Tensiones de <i>Von Mises</i> sin visualización de mallado inicial	45
3.34	Mallado cuadrático del molde en 3 dimensiones	46
3.35	Malla cuadrática frontal	47
3.36	Malla cuadrática superior	47
3.37	Orificios con mallado lineal	47
3.38	Orificios con mallado cuadrático	48
3.39	Tensiones de <i>Von Mises</i> con mallado cuadrático	49
3.40	Tensiones de <i>Von Mises</i> zona izquierda sin visualización de mallado cuadrático	49
3.41	Tensiones de <i>Von Mises</i> zona derecha sin visualización de mallado cuadrático	50
3.42	Semillas para el mallado	51
3.43	Mallado final del molde en 3 dimensiones	52
3.44	Malla final frontal	52
3.45	Malla final superior	52
3.46	Tensiones de <i>Von Mises</i> con mallado final	53
3.47	Tensiones de <i>Von Mises</i> zona izquierda	53
3.48	Tensiones de <i>Von Mises</i> zona derecha	54
3.49	Tensiones de <i>Von Mises</i> zona de orificios	54
3.50	Tensiones de <i>Von Mises</i> zona de orificios	54
3.51	Pieza en forma de omega	56
3.52	Divisiones de la superficie. Vista frontal	57
3.53	Divisiones de la superficie. Vista superior	57
3.54	Mallado inicial de la pieza	58
3.55	Mallado inicial de la pieza. Vista superior	58
3.56	Detalle del mallado inicial de la pieza	59
3.57	Valores para la geometría mallada de la pieza	60
3.58	Detalle de la geometría mallada de la pieza	60
3.59	Mallado inferior de la pieza	61
3.60	Material asignado a la pieza	62
3.61	Valores de apoyo de la pieza	63
3.62	Valores de carga sobre la pieza	63
3.63	Apoyo de la pieza	63
3.64	Carga sobre la pieza	64
3.65	Tensiones de <i>Von Mises</i> máximas con mallado 1	65

3.66	Tensiones de <i>Von Mises</i> máximas en el lado de apoyo	65
3.67	Tensiones de <i>Von Mises</i> máximas en el lado de la fuerza	66
3.68	Valores de desplazamientos en los ejes X, Y, Z	67
3.69	Desplazamientos en el plano XY	68
3.70	División de una sección de la cara superior para el mallado	69
3.71	Mallado uniforme de la pieza	69
3.72	Mallado uniforme de la pieza. Vista superior	70
3.73	Valores de apoyo de la pieza con mallado uniforme	71
3.74	Valores de carga sobre la pieza con mallado uniforme	71
3.75	Apoyo de la pieza con mallado uniforme	72
3.76	Carga sobre la pieza con mallado uniforme	72
3.77	Tensiones de <i>Von Mises</i> máximas con mallado uniforme	73
3.78	Tensiones de <i>Von Mises</i> máximas en el lado de apoyo con malla uniforme	73
3.79	Tensiones de <i>Von Mises</i> máximas en el lado de la fuerza con malla uniforme	74
3.80	Valores de desplazamientos en los ejes X, Y, Z con malla uniforme . . .	75
3.81	Desplazamientos en el plano XY con malla uniforme	76
3.82	Propiedades para una capa monodireccional	77
3.83	Ejes considerados en el material compuesto	78
3.84	Criterios de fallo seleccionados	78
3.85	Valores tomados para el criterio de Tsai-Wu	79
3.86	Valores tomados para el criterio de Hashin	79
3.87	Propiedades del laminado del material	80
3.88	Visualización del laminado del material	81
3.89	Dirección 1 del laminado	82
3.90	Detalle de la dirección 1 del laminado en radios de acuerdo	82
3.91	Resultados a obtener en la simulación	83
3.92	Índice de fallo 1. Máximo de Tsai-Wu	84
3.93	Índice de fallo 6. Máximo de Hashin	84
3.94	Valores de desplazamientos en los ejes X, Y, Z en material compuesto .	86
3.95	Desplazamientos en el plano XY con material compuesto	87

1 Introducción

1.1. Objetivo

Es muy conocido el problema de aparición de defectos en piezas de composite termoconformadas, es por ello que, en la línea de trabajo de la empresa *SEGULA Technologies*, se pretendía colaborar con el desarrollo de nuevas herramientas que permitan anticipar las condiciones que provocan la aparición de fallos en piezas de composite termoconformadas que obligan a operaciones de reparación y saneamiento posteriores.

Por esto se va a estudiar y desarrollar un modelo por elementos finitos de un utillaje para termoconformado de materiales compuestos para su análisis y reproducción de defectos en pieza cuando esta se somete a cargas externas.

Se considera que con el conocimiento de estas condiciones de fallo, será posible establecer nuevas formas de fabricación que reduzcan el ratio de rechazo y puedan aumentar el grado de utilización de dicho material a un mayor número de aplicaciones respecto de las actuales.

Debido a la situación extraordinaria acontecida durante este año, 2020, la colaboración con la empresa *SEGULA Technologies* cesa, pero se continua igualmente con el proyecto planteado inicialmente. De este modo, se pretende diseñar y analizar los moldes para detectar cuáles son sus puntos débiles, los cuales podrán provocar fallos en pieza o, incluso, su rotura o la del propio molde. Además, se quiere realizar una comparación de comportamiento de una pieza fabricada en aluminio frente a una de material compuesto.

1.2. Alcance

Se trata de un proyecto mediante el cual se pretendía desarrollar un modelo por elementos finitos de un utillaje para piezas termoconformadas en material compuesto para su posterior comparación con resultados obtenidos previamente y la comprobación de la validez de los mismos.

Con el cese de la colaboración con la empresa *SEGULA Technologies*, no se realizará una comparación con los resultados obtenidos por la propia empresa en ocasiones anteriores, sino que se analizarán los resultados obtenidos.

Para ello en primer lugar, se va a desarrollar un modelo en tres dimensiones a partir del cual se realiza un análisis de requerimientos y de los casos de carga que ha de soportar el utillaje y la pieza.

Posteriormente se desarrolla el modelo por elementos finitos del molde a partir del cual se realizan los cálculos y simulaciones. Su comportamiento se estudia para poder llegar a una solución concluyente y lo más fiel a la realidad posible, captando todas las posibles fuentes de fallo y planteando soluciones para su mejora.

Posteriormente se hace un análisis de comportamiento de la pieza aplicando diferentes criterios de fallo, en función de si se trata de un material isótropo o un material compuesto.

1.3. Termoconformado

El proceso de termoconformado es un proceso de transformación utilizado, en principio, para materiales compuestos con matriz termoplástica. Para llevarlo a cabo, se calienta el material polimérico hasta que se reblandece lo suficiente como para adaptarse a la forma de un molde aplicándole una determinada presión o vacío y temperatura.

En esta ocasión, tenemos material compuesto con matriz termoestable al cual se le añaden enlaces covalentes, mediante un endurecedor, en la matriz polimérica. De esta manera, la red obtenida después del curado puede dar lugar a reacciones de intercambio mediante la aplicación de calor y presión. Esto es posible gracias a los enlaces covalentes reversibles del endurecedor que tienen la capacidad de intercambiarse unos con otros sin destruir la red, por lo que pueden ser remodelados.[1]

Sus ventajas son las siguientes:

- Proceso secundario de alta productividad.
- Moldes sencillos en comparación con otros métodos.
- Mayor agilidad y menores inversiones en la construcción del molde, dotando de una mayor facilidad a la hora de realizar cambios en los moldes.

El proceso de termoconformado requiere de cierta maquinaria:

- Fuente de calentamiento. Se debe conseguir que la temperatura de la lámina sea la óptima con una tolerancia de $\pm 5^{\circ}C$. Esto se consigue mediante alambres de calefacción, infrarrojos, barras de resistencias, radiadores, placas radiantes... Además, la temperatura superficial del calentador se controla mediante termopares y el calentamiento de la placa se establece mediante iteración con el tiempo.
- La estación de conformado, incluyendo el bastidor de la máquina, la mesa de conformado con el sistema de arrastre y el de expulsión.



Figura 1.1: Estación de conformado

Si el material es alimentado en rollos, se realiza un arrastre mediante tetones o pinchos montados sobre cadenas paralelas; aunque para láminas más gruesas se utilizan agarres de pinzamiento que pueden retroceder en función de la dilatación de la lámina, manteniéndola plana en todo momento. La transferencia de la lámina se efectúa entre topes.

La estación de conformado debe incluir los elementos necesarios para tensar la lámina, enfriarla y extraerla del molde. Debe ser fácil el mantenimiento y cambio de moldes y el ajuste en altura de la apertura de los mismos, así como conectar los medios de enfriamiento y control de temperatura.

La estructura de soporte debe ser suficiente para soportar moldes pesados y debe de dar acceso sencillo a las líneas de vacío o aire comprimido.

Además, debe de ser capaz de albergar un sistema de desmoldeo en caso de que este no vaya integrado.

- Sistema de vacío o presión.
- Marco de estirado de la lámina y mecanismo de transporte.
- Sistema eléctrico o electrónico para los automatismos.
- Equipo adicional de manejo, ajuste y recorte de la lámina.

Para realizar un modelado mediante termoconformado es necesario contar con moldes, que serán los encargados de dar la forma deseada a nuestra plancha. Estos moldes pueden ser de diversos materiales:

- Madera (pino, caoba, cedro, arce, aglomerado. . .) Solo para baja producción.

Son de bajo coste, con tiempo de construcción corto y buen acabado superficial, aunque la veta de la madera puede dejar marcas. Estos moldes deben estufarse y si se quieren conseguir mejores acabados y evitar variaciones dimensionales por humedad y temperatura, se debe sellar. Del mismo modo se puede mejorar la vida útil del mismo reforzando las aristas con metal.

- Minerales (yeso(carbonato de calcio), fluosilicato de sodio) Para baja o media producción.

Estos moldes tienen más duración que los de madera. Además, pueden ser reforzados con malla de metal, fibra de vidrio u otros materiales que no absorban

humedad. Para su realización, se vacía yeso sobre un modelo y se deja curar; si el modelo es bueno, no se requiere de un tratado posterior aunque se recubre con resina de poliéster, epoxi o fenólica, haciéndolo así más resistente.

- Resinas plásticas (Resina de poliéster, resina epoxi, resina fenólica, laminados plásticos, nylon...) Para media producción.

Son más costosos que los anteriores pero brindan una duración mayor, con superficies más tersas y mejor estabilidad dimensional. Del mismo modo, a estas resinas se les puede añadir polvo de aluminio, caolín, fibra de vidrio...

- Metal (Aluminio, acero, cobre-berilio, hierro) Para alta producción.

Se utilizan con altas presiones y formados mecánicos. Son los más costosos y costosos de producir. A cambio de esto tienen un mejor acabado superficial, bajo coste de mantenimiento y mejor estabilidad dimensional. Es necesario contar con un sistema de enfriamiento.

Otro aspecto de gran importancia en el termoconformado es el **enfriamiento**. Se van a distinguir dos enfriamientos:

- Enfriamiento del molde.

Sobre todo cuando hay una alta producción es interesante que los moldes cuenten con un sistema de refrigeración. Generalmente se utiliza un tubo de cobre localizado adecuadamente y con capacidad suficiente para transportar el volumen necesario de agua o refrigerante.

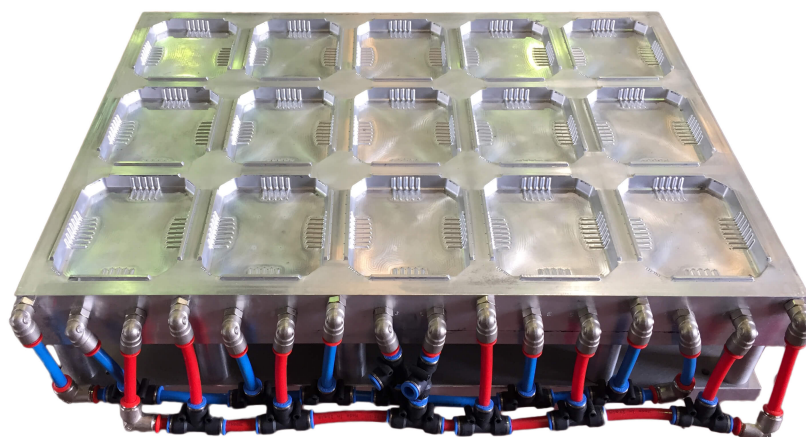


Figura 1.2: Enfriamiento de molde

Debe tenerse en cuenta que el molde no debe enfriarse en exceso ya que podría afectar a la temperatura del material de la pieza pudiendo hacer que se encuentre por debajo del límite inferior de la temperatura de moldeo.

Cuando existen zonas críticas de moldeo se pueden poner insertos o recubrimientos plásticos, que cuentan con una conducción térmica más pobre.

Los principales sistemas de enfriamiento se muestran en la Figura 1.3

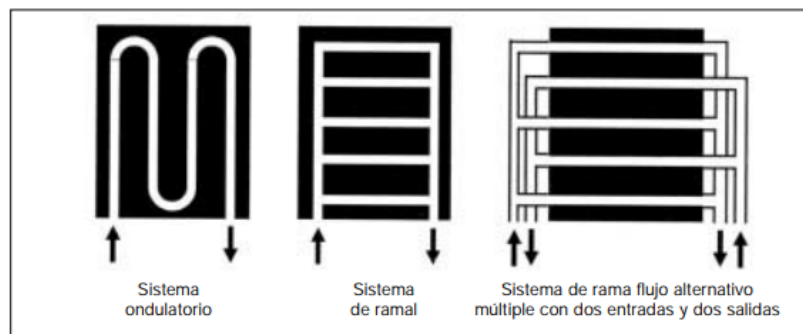


Figura 1.3: Sistemas de enfriamiento de moldes en termoconformado

- Enfriamiento de las piezas.

Tiene gran importancia y, en algún caso, puede llevar más tiempo que el propio calentamiento. En esta fase debe disiparse la mayor parte del calor absorbido durante el ciclo de calentamiento antes de que se retire el molde ya que, de otra forma, podrían darse distorsiones y alabeos en la pieza, aunque si hay moldes macho deberán desmoldar antes de que se presente un encogimiento y resulte más difícil proceder a su extracción.

Los métodos de enfriamiento son la conducción y la convección, y teniendo en cuenta la baja conductividad térmica de los polímeros, en ocasiones se hace uso de ventiladores.

El enfriamiento de la pieza en contacto con el molde es muy eficiente si es un molde de metal y tiene conductos de enfriamiento con recirculación de refrigerante. En estos casos, es interesante controlar el refrigerante para mantener la temperatura del molde uniforme.

1.4. Materiales compuestos

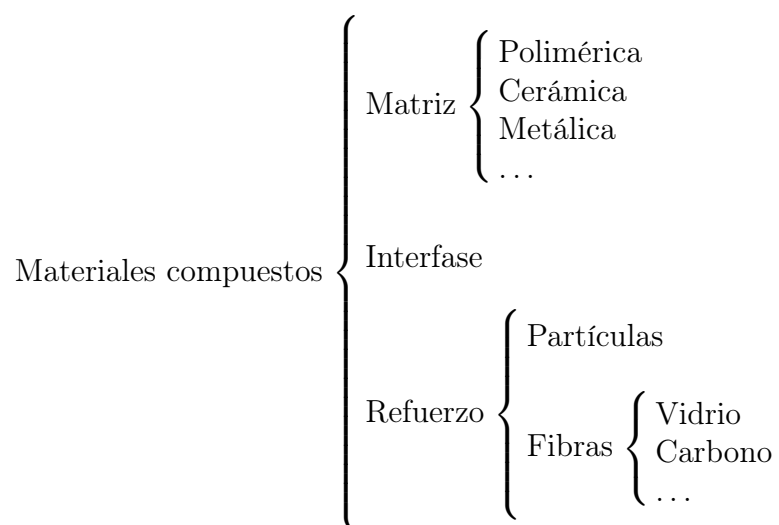
Los materiales compuestos o composites[2, 3] son aquellos que presentan una combinación de dos o más constituyentes en su estructura a escala macroscópica de forma que se pueden obtener materiales con características y propiedades que de otra manera sería imposible tener con materiales únicamente cerámicos, metálicos o plásticos, abriendo ampliamente las posibilidades de aplicación y mejorando las propiedades de los constituyentes por separado.

Los composites cuentan con una fase matriz, de carácter continuo que rodea a las fases dispersas. Estas fases se encuentran separadas mediante una intercara o interfase.

Las propiedades de estos materiales dependen de las fases constituyentes, de sus proporciones relativas y de la geometría de la fase dispersa; pero en todos los casos deben cumplir unas características, que son:

- En su estructura por lo menos dos componentes distinguibles, químicamente distintas e insolubles y separadas por una interfase.
- Cuentan con unas propiedades mecánicas mejores que los materiales utilizados si se estudiasen de manera separada. Además, se da una sinergia entre las propiedades de las fases.

Además, los materiales compuestos cuentan con los siguientes elementos:



■ Refuerzo

Se trata de la fase dispersa del material. Es la que se encarga de dar la rigidez y resistencia que necesita el material. Variará dependiendo del tipo y podrán ser fibras o partículas.

Además, la distribución topológica de estos determina el grado de uniformidad del material, mientras que su orientación y geometría influirá en el grado de anisotropía¹.

■ Matriz

Se trata de la fase continua y menos rígida del material.

La fase matriz ejerce varias funciones:

- Actúa como aglutinante y protector. Es el medio que distribuye y transmite a las fibras los esfuerzos externos, ya que es la fibra quien resiste la mayor parte del esfuerzo aplicado.
- Protege del deterioro superficial resultante de la abrasión mecánica o de reacciones con el medio ambiente.
- Separa fibras e impide la propagación de grietas, haciendo necesario que se rompan muchas fibras hasta la rotura total del material.

■ Interfase o intercara

Para que las propiedades del material se comporten correctamente, es necesario asegurar la correcta unión entre las fases. Será de ella de quien dependa en gran medida la rigidez y resistencia del material, así como la resistencia a la fractura.

■ Cargas

Son productos que, incorporados al composite, aportan propiedades concretas o reducen el coste de fabricación del mismo. Se diferencian de los aditivos en la cantidad.

Se dividen en dos grupos:

¹Cualidad de un cuerpo que tiene una propiedad física que tiene un valor diferente cuando se mide en distintas direcciones. De una propiedad o fenómeno, que varía en magnitud según la dirección de la medición

- Reforzantes. Reparten regularmente los esfuerzos y evitan por tanto las concentraciones de tensiones.
- No reforzantes. Se utilizan para conseguir características concretas y ajustar el precio.

■ Aditivos

Sustancias empleadas, en menor proporción que las cargas, para aumentar las prestaciones del material.

Son sustancias específicas que afectan generalmente a una única propiedad, por lo que se suelen usar varios en un mismo material compuesto (siempre que sean compatibles) para lograr las características requeridas.

■ Núcleo o core

No es un elemento indispensable en los materiales compuestos y en muchas ocasiones no se utiliza. Puede ser útil para aplicaciones específicas en las que se requiera una disminución del peso o del precio, contando con una capacidad tensional suficiente. Generalmente, este núcleo no tiene función estructural.

1.4.1. Clasificación

Los materiales compuestos se pueden clasificar en tres grupos en función de su estructura.

Materiales compuestos reforzados con partículas

Dentro de este grupo se puede hacer una subclasificación, que se fundamenta en el mecanismo de consolidación o reforzamiento y del tamaño de las partículas de refuerzo.

■ Con partículas grandes.

Se suelen tener gran cantidad de partículas equiaxiales, aunque pueden tener una gran variedad de geometrías. Estas partículas no dificultan de manera efectiva el desplazamiento de las dislocaciones. El reforzamiento es más efectivo cuanto más pequeñas sean las partículas y más homogéneamente se encuentren distribuidas por la matriz. Del mismo modo, también es influyente la fracción de volumen entre las fases.

Además, las propiedades mecánicas mejoran con el contenido en partículas, es decir, con el incremento de la relación partículas/matriz.

Con este tipo de compuestos no se pretende mejorar la resistencia, sino conseguir combinaciones de propiedades poco frecuentes.

- Consolidados por dispersión.

Las partículas en este caso son muy pequeñas, del orden de 100 a 2500 Å. Con este tipo de refuerzo se dificultan los movimientos de las dislocaciones, produciendo un endurecimiento notable en el material con la adición de pequeñas cantidades de partículas.

En estos compuestos, se pueden optimizar las propiedades considerando que la fase dispersa debe ser un obstáculo efectivo para el desplazamiento, contando con la forma, tamaño, distribución y cantidad óptimos. Del mismo modo, debe ser poco soluble en la matriz y no deben existir reacciones químicas entre ellas. Finalmente, debe conseguirse una buena unión material, es decir, debe contar con una buena interfase.

Materiales compuestos reforzados con fibras

Se trata de los composites más importantes y generalmente tratan de buscar elevada resistencia y rigidez con una baja densidad.

Las características de los composites dependen en gran medida de las fibras utilizadas. La fibra es el componente de refuerzo del material compuesto, es por esto que dependiendo de él se obtendrán muy diferentes resistencias mecánicas, rigideces y durezas.

La disposición u orientación relativa de las fibras y su concentración y distribución influyen mucho en las propiedades que desarrolla el material compuesta, existiendo dos situaciones extremas, alineación paralela a los ejes longitudinales de la fibra o alineación al azar, como puede observarse en la Figura 1.4

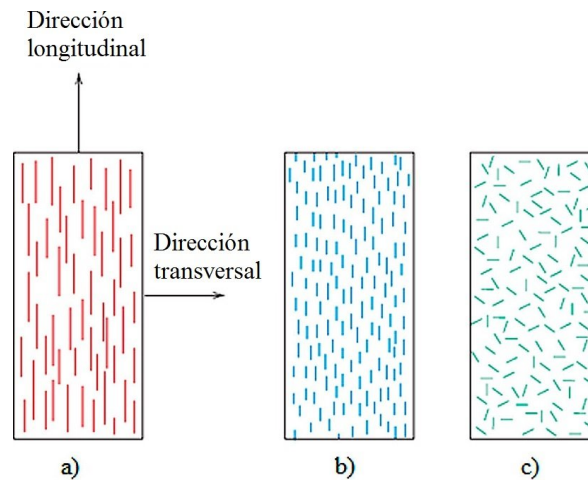


Figura 1.4: Orientación de fibras en composites reforzados por fibras

De este modo, se tendrá que si las fibras se encuentran continuas y alineadas, el material tendrá un carácter altamente anisótropo, dependiendo por tanto sus propiedades de la dirección en la que se mida; mientras que si se tienen desordenadas, las propiedades serán más uniformes.

Materiales compuestos estructurales

Presentan una combinación de materiales homogéneos y las propiedades pueden depender más de la geometría del diseño que de las fases constituyentes.

Suelen ser capas de materiales laminares o sándwiches y son anisotrópicos.

1.4.2. Materiales compuestos de estudio: composites termoestables reciclables, reprocesables, reparables y reutilizables

Los materiales compuestos con base de resina epoxi son altamente utilizadas en la fabricación de materiales compuestos de altas prestaciones ya que cuentan con una gran estabilidad térmica, buena rigidez, y resistencia a la fluencia, sin embargo, al tratarse de resinas termoestables, no se pueden reprocesar, reciclar o reparar una vez se han curado. Es por esto que se están investigando nuevas formas de producir este tipo de composite, incorporando enlaces reversibles dentro de la estructura reticulada.

Al realizar esto, se tienen enlaces dinámicos que cambian las propiedades del material, dotándole de algunas impensables anteriormente para los termoestables.[1]

Se utilizan para materiales compuestos reforzados con fibras de carbono o de vidrio y cuentan con propiedades mecánicas similares a los composites termoestables convencionales y, además, son reciclables, reparables y reprocesables.

Hay varios tipos de enlaces covalentes que se pueden utilizar para conseguir este tipo de material, pero presentan ciertos problemas que todavía no se han conseguido solventar totalmente, como la insolubilidad de los catalizadores, envejecimiento, mala estabilidad frente a la oxidación o hidrólisis, degradación térmica durante el procesado, coste, problemas de estado. . .

De este modo, se puede conseguir este tipo de materiales sustituyendo el endurecedor convencional por un endurecedor dinámico, de forma que los composites laminados pueden ser remodelados aplicando presión y temperatura, y reciclados por métodos químicos o mecánicos.[4]

1.5. Criterios de fallo en materiales compuestos

Los materiales compuestos pueden presentar diversos modos de fallo, alguno de ellos está relacionado con los constituyentes y otros con el fallo de la interfase.

En el caso del fallo en la matriz, lo más habitual es que se den microfisuraciones, apareciendo grietas debido a los esfuerzos de tracción, compresión y cortante. De este modo, el material pierde propiedades mecánicas.

Si el fallo se da en el refuerzo, puede ser producido por tracción o por compresión, que genera pandeo. Si se trata de refuerzos en forma de fibras, los fallos no se suelen mostrar en forma de deformación plástica, sino que se da una redistribución de esfuerzos al resto de fibras, especialmente a las más cercanas, causando nuevas rupturas de fibras

Por último se puede dar el fallo en la interfase, que genera una pérdida de adhesión y un deslizamiento relativo entre las fases por diferencias de esfuerzos cortantes. También puede provocar delaminación.

Los criterios de fallo en composites se pueden dividir en tres tipos[2, 3]:

- **Criterios no interactivos o de de límite.** No tienen interacción entre las

componentes de deformación y los esfuerzos. Predicen carga de rotura y el modo comparando tensiones o deformaciones de lámina con la resistencia admisible del material. A este bloque pertenecen los criterios del máximo esfuerzo y el de la máxima deformación.

- **Criterios interactivos.** Involucran la interacción entre las componentes de esfuerzos y de deformaciones y predicen la carga de rotura con ecuación cuadrática o superior. Estos criterios tienen el problema de no dejar definido el modo de fallo, sino que únicamente predicen donde comienza el mismo. Intervienen todas las componentes de tensión o deformación. Cuando la ecuación se hace cero, se produce el fallo y el modo se puede obtener de manera indirecta mediante comparación de relaciones.
- **Criterios de modo.** Separan el criterio de rotura de la matriz respecto del de fibras, variando, además, de un criterio a otro. De esta manera, si la ecuación de fallo cuenta con un solo componente de esfuerzo, el fallo corresponderá a una dirección en particular; de otro modo, se deberán comparar relaciones de esfuerzo o resistencia.

A continuación se exponen varios de los criterios de fallo más importantes para materiales compuestos [2, 5, 6], los cuales parten de la Teoría Clásica de Laminación de Placas.

1.5.1. Tsai-Wu

Se trata de un criterio de fallo interactivo y es una generalización del criterio de Tsai-Hill, basado a su vez en el criterio de Von-Mises para materiales isótropos.

Su expresión general es una elipse de tensiones en el espacio de forma:

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1, \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (1.1)$$

Donde F_i y F_{ij} son los componentes del tensor de resistencia.

Si esta expresión se expandiese a tres dimensiones, se obtendría una expresión con 27 coeficientes, de los cuales 6 se deben a F_i y las 21 restantes a las interacciones F_{ij} .

Varios de esos valores de F se hacen nulos dependiendo de la simetría de la pieza de estudio y del tipo de material. Además, propone que **la tensión de fallo es independiente del signo de la tensión a cortante.**

Aplicando todas estas consideraciones, se puede obtener la siguiente expresión general para tres dimensiones:

$$F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}[\sigma_2^2 + \sigma_3^2] + F_{44}\sigma_4^2 + F_{66}[\sigma_5^2 + \sigma_6^2] + 2F_{12}[\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3] + 2F_{23}\sigma_2\sigma_3 + F_1\sigma_1 + F_2[\sigma_2 + \sigma_3] = 1 \quad (1.2)$$

A partir de esta, realizando un ensayo de tracción y un ensayo a compresión en la dirección de las fibras y en la dirección perpendicular a las mismas, un ensayo a cortadura y un ensayo de tracción biaxial (o considerar una equivalencia con el criterio de Von Mises) y operando con los datos obtenidos se puede obtener que para una lámina ortotrópica² trabajando en tensión plana (dos dimensiones) se tiene:

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_6\sigma_6 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{66}\sigma_6^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 = 1 \quad (1.3)$$

La representación en dos dimensiones de la superficie de fallo según este criterio se puede ver en la Figura 1.5

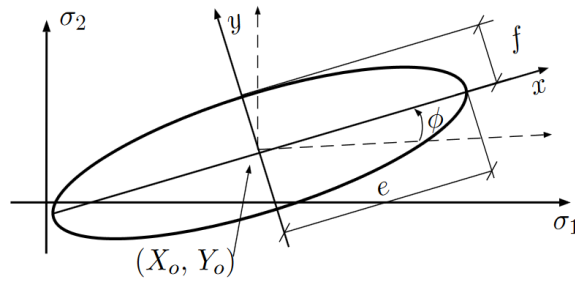


Figura 1.5: Superficie de fallo del criterio Tsai-Wu

Además, el programa *Marc Mentat* calcula en cada punto de integración el siguiente índice de fallo:

$$\begin{aligned} &[(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c})\sigma_1 + (\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c})\sigma_2 + (\frac{1}{Z_t} - \frac{1}{Z_c})\sigma_3 + \frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{\sigma_3^2}{Z_t Z_c} + \\ &\quad \frac{\tau_{12}^2}{S_{12}^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{23}^2} + \frac{\tau_{13}^2}{S_{13}^2} + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2F_{23}\sigma_2\sigma_3 + 2F_{13}\sigma_1\sigma_3] \end{aligned} \quad (1.4)$$

Donde:

- X_t, X_c . Tensiones máximas admisibles en la dirección 1.

²Material ortótropo. Material que tiene propiedades mecánicas diferentes en direcciones ortogonales diferentes; p.ej., la madera respecto a la dirección de la fibra.

- Y_t, Y_c . Tensiones máximas admisibles en la dirección 2.
- Z_t, Z_c . Tensiones máximas admisibles en la dirección 3.
- S_{12} . Máximo esfuerzo de corte permitido en plano.
- S_{23} . Máximo esfuerzo de corte permitido en dirección 23.
- S_{31} . Máximo esfuerzo de corte permitido en dirección 31.
- F_{12} . Constante de fuerza interactiva para el plano 12.
- F_{23} . Constante de fuerza interactiva para el plano 23.
- F_{13} . Constante de fuerza interactiva para el plano 13.

Y así, para tensión plana se tiene:

$$\left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}\right)\sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}\right)\sigma_2 + \frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{\sigma_{12}^2}{S_{12}} + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 \quad (1.5)$$

1.5.2. Hoffman

Se trata de un criterio de fallo interactivo basado en el criterio de Tsai-Hill, el cual tiene en cuenta las grandes diferencias entre las resistencias a tracción y compresión y las recoge en una única ecuación:

$$C_1[\sigma_2 - \sigma_3]^2 + C_2[\sigma_3 - \sigma_1]^2 + C_3[\sigma_1 - \sigma_2]^2 + C_4\sigma_1 + C_6\sigma_3 + C_7\sigma_4^2 + C_8\sigma_5^2 + C_9\sigma_6^2 = 1 \quad (1.6)$$

Los coeficientes dependen de los parámetros del material y se determinan realizando 3 ensayos uniaxiales a tracción, 3 a compresión y 3 a cortante.

De esta forma se obtienen la siguiente ecuación en 3D:

$$C_1[\sigma_2 - \sigma_3]^2 + C_2[(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2] + C_4\sigma_1 + C_5[\sigma_2 + \sigma_3] + C_7[\sigma_4^2 + \sigma_5^2] + C_9\sigma_6^2 = 1 \quad (1.7)$$

Y en caso de tensión plana:

$$\begin{aligned} C_1\sigma_2^2 + C_2[\sigma_1^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2] + \\ C_4\sigma_1 + C_5\sigma_2 + C_9\sigma_6^2 = 1 \end{aligned} \quad (1.8)$$

Además, el programa *Marc Mentat* calcula en cada punto de integración el siguiente índice de fallo:

$$\begin{aligned} C_1[\sigma_2 - \sigma_3]^2 + C_2[(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2] + \\ C_4\sigma_1 + C_5\sigma_2 + C_6\sigma_3 + C_7\sigma_{23}^2 + C_8\sigma_{13}^2 + C_9\sigma_{12}^2 \end{aligned} \quad (1.9)$$

Donde:

- $C_1 = \frac{1}{2}(\frac{1}{Z_t Z_c} + \frac{1}{Y_t Y_c} - \frac{1}{X_t X_c})$
- $C_2 = \frac{1}{2}(\frac{1}{X_t X_c} + \frac{1}{Z_t Z_c} - \frac{1}{Y_t Y_c})$
- $C_3 = \frac{1}{2}(\frac{1}{X_t X_c} + \frac{1}{Y_t Y_c} - \frac{1}{Z_t Z_c})$
- $C_4 = \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}$
- $C_5 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}$
- $C_6 = \frac{1}{Z_t} - \frac{1}{Z_c}$
- $C_7 = \frac{1}{S_{23}^2}$
- $C_8 = \frac{1}{S_{13}^2}$
- $C_9 = \frac{1}{S_{12}^2}$

Y donde $X_t, X_c, Y_t, Y_c, Z_t, Z_c, S_{12}, S_{23}, S_{31}, F_{12}, F_{23}, F_{13}$ son las mismas variables que en el caso anterior.

Y así, para tensión plana se obtiene:

$$(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c})\sigma_1 + (\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c})\sigma_2 + \frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{\sigma_{12}^2}{S_{12}^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X_t X_c} \quad (1.10)$$

1.5.3. Christensen

Se trata de un criterio de fallo asociado a los modos de fallo que se basa en la simetría transversal de los materiales compuestos de fibra.

Se consideran 7 invariantes de tensión:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \sigma_1 \\
 I_2 &= \sigma_2 + \sigma_3 \\
 I_3 &= \sigma_1^2 \\
 I_4 &= (\sigma_2 + \sigma_3)^2 \\
 I_5 &= \sigma_1(\sigma_2 + \sigma_3) \\
 I_6 &= \sigma_6^2 + \sigma_5^2 \\
 I_7 &= \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + 2\sigma_4^2
 \end{aligned} \tag{1.11}$$

A partir de estos, se consideran dos modos de fallo:

- Fallo de matriz. Se da cuando: $f(I_2, I_4, I_6, I_7) \leq 1$
- Fallo de fibras. Se da cuando $f(I_1, I_3, I_5) \leq 1$

Al utilizar este método, se deben considerar los dos modos de fallo posibles en todos los casos, aunque para ciertos esfuerzos sólo se podrá evaluar uno de ellos.

Además, el fallo no se puede producir bajo tensión hidrostática y se considera causa de ruptura del material el caso de que alguna de las ecuaciones que considera el método no se cumpla.

1.5.4. Hashin

Se trata de un criterio de fallo asociado a los modos de fallo. Propone un criterio para un estado biaxial de tensiones que se basa en dos modos de fallo, uno basado en el fallo de las fibras debido generalmente a tensiones longitudinales y otro basado en el fallo de la matriz, gobernado generalmente por tensiones transversales y tangenciales a la fibra.

Además, tiene en cuenta si se trata de tracción o de compresión ya que dependiendo de esto la naturaleza del fallo será de rotura o de micropandeo respectivamente.

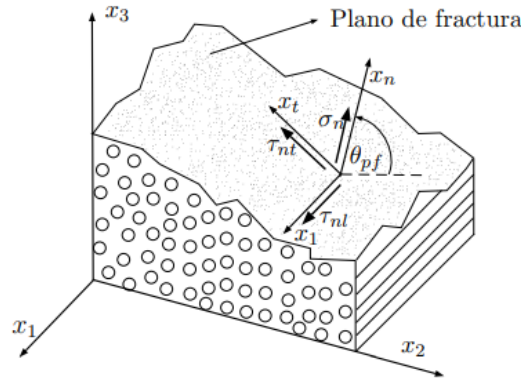


Figura 1.6: Plano de rotura material compuesto

Los modos de fallo que aparecen son los siguientes:

- Fallo de fibra. Se observan de manera experimental los fallos de materiales compuestos unidireccionales y se obtiene que, en el modo de fallo de fibra, el plano de rotura equivale al yx , representado como x_1x_2 en la Figura 1.6; de esta manera, los esfuerzos producidos serían $\sigma_1, \sigma_5, \sigma_6$

Además, diferencia entre fallo a tracción y a compresión:

- Fallo de fibra a tracción. $\sigma_1 > 0$
- Fallo de fibra a compresión $\sigma_1 < 0$
- Fallo de matriz. En este caso, el plano de rotura es paralelo a la fibra y depende de un ángulo θ .

De la misma manera, diferencia entre fallo a tracción y a compresión:

- Fallo de matriz a tracción. $\sigma_2 + \sigma_3 > 0$
- Fallo de matriz a compresión $\sigma_2 + \sigma_3 < 0$

En este caso, *Marc Mentat* calcula seis índices de fallo que son los siguientes:

- Tensión en fibra. $\sigma_1 > 0$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \frac{1}{S^2}(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1 \text{ ó } \sigma_{11} = X_t \quad (1.12)$$

- Compresión en fibra. $\sigma_1 < 0$

$$\frac{|\sigma_{11}|}{X_c} = X_c \quad (1.13)$$

- Tensión en matriz. $\sigma_2 + \sigma_3 > 0$

$$\frac{1}{Y_t}(\sigma_2 + \sigma_3)^2 + \frac{1}{S_{23}^2}(\sigma_{23}^2 - \sigma_2\sigma_3 + \frac{1}{S_{12}}(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2)) \quad (1.14)$$

- Tensión en matriz. $\sigma_2 + \sigma_3 < 0$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{Y_c}((\frac{Y_c}{2S_{23}})^2 - 1)(\sigma_2 + \sigma_3) + \frac{1}{4S_{23}^2}(\sigma_2 + \sigma_3)^2 + \\ & \frac{1}{S_{23}^2}(\sigma_{23}^2 - \sigma_2\sigma_3) + \frac{1}{S_{12}^2}(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) \end{aligned} \quad (1.15)$$

- Máximo. Se trata de un postprocesado que indica el máximo de los anteriores.
- Mínimo. Se trata de un postprocesado que indica el mínimo de los anteriores.

1.5.5. Puck

Se trata de un criterio de fallo asociado a los modos de fallo y se basa en la hipótesis de fractura de Möhr³ de modo que solo contribuyen al criterio las componentes de tensión que influyen realmente en un mecanismo. La resistencia del material se determina por las tensiones del plano de fractura en el momento de la rotura

Se introduce el concepto *plano de acción*, que es el plano en el que la probabilidad de producirse el fallo es mayor.

Se tienen 2 mecanismos de fallo distintos e independientes entre ellos. La capacidad portante de un laminado depende mucho de la resistencia de sus fibras por lo que es muy importante tener en cuenta el fallo de las fibras en el diseño, aunque muchas veces aparece el fallo de la matriz antes de que las fibras alcancen su máxima deformación admisible. Ambos mecanismos se caracterizan por una rotura súbita local sin apenas deformaciones plásticas; se da un fallo frágil.

- En caso de fallo de fibra, se establece una ecuación en la que se ve reflejada la

³La hipótesis de fractura de Möhr establece que el “límite de fractura de un material está determinado por las tensiones en el plano de fractura”

tensión máxima y se basa en la consideración de que el material falla cuando la fibra más cargada alcanza cierto valor de tensión crítica(FF).

- A tracción. Rotura simultánea de la mayoría de fibras.
 - A compresión. Se da micropandeo de fibras. Depende en gran medida de la interacción fibra-matriz, afectando por tanto los defectos presentes en la matriz.
- En caso de que lo que falle sea la matriz, se debe a la generación de microgrietas que producen concentraciones de tensiones y que producen inicios de delaminaciones locales. Se tienen 3 modos de fallo:
- Modo A debido a tracción.
 - Modo B y C debidos a compresión.

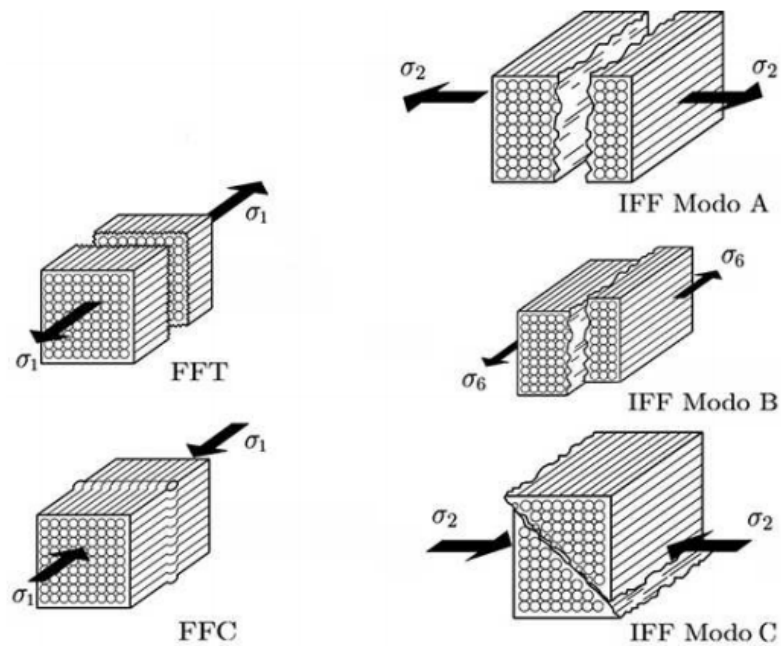


Figura 1.7: Mecanismos de fallo por Puck

2 Normas y referencias

2.1. Disposiciones legales y normas aplicadas

Para la correcta realización del modelo y su estudio, es necesario conocer y cumplir las normativas vigentes con las que la empresa, *SEGULA Technologies*, se ve comprometida y tienen relación directa con el caso de estudio:

- ISO 9001.
Garantiza que los clientes reciban productos y servicios de calidad en cuanto a sus exigencias de calidad-coste-plazo.
- PACTO MUNDIAL DE LAS NACIONES UNIDAS.
Se encuentran adheridos al pacto desde 2016, debiendo cumplir por tanto los diez principios fundamentales en las áreas de derechos humanos, normas laborales, medio ambiente y lucha contra la corrupción. De esta forma confirman su compromiso RSE y contribuyen a los desafíos del desarrollo sostenible.

Del mismo modo, para el diseño y presentación de este proyecto se van a seguir las siguientes disposiciones legales y normas:

- Asociación Española de Normalización. (1999). UNE-EN ISO 5457: Documentación técnica de productos. Formatos y presentación de los elementos gráficos de las hojas de dibujo. Madrid: AENOR.
- Asociación Española de Normalización. (1996). UNE-EN ISO 5455: Dibujos técnicos. Escalas. Madrid: AENOR.
- Asociación Española de Normalización. (1995). UNE 1-027-95: Dibujos técnicos. Plegado de planos. Madrid: AENOR.
- Asociación Española de Normalización. (1998). UNE 1-035-95: Dibujos técnicos.

Cuadro de rotulación. Madrid: AENOR.

- Asociación Española de Normalización. (1994). UNE 1-039-94: Dibujos técnicos. Acotación. Madrid: AENOR.
- Asociación Española de Normalización. (2004). UNE 157001: Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico. Madrid: AENOR.

2.2. Programas de diseño y cálculo

Para la realización del diseño 3D del modelo se utiliza el programa de diseño *Solid-Works*[7], de la empresa francesa *Dassault Systèmes*.

Para la realización de los cálculos y simulaciones se utiliza el programa *Marc Mentat*[8], software específico para análisis por elementos finitos y simulación. Se trata de una potente solución de análisis de elementos finitos no lineales de propósito general para simular con precisión el comportamiento de piezas con cargas estáticas, dinámicas y multifísicas. Es un *software* muy versátil en cuanto a modelado de comportamientos no lineales y condiciones transitorias, lo que lo convierte en un programa ideal para resolver problemas de diseño complejos, siendo capaz además de predecir daño, fallos y propagaciones de grieta combinado con análisis térmicos, eléctricos, magnéticos y estructurales.

3 Desarrollo del utillaje

Para la realización de las simulaciones, se van a diseñar los dos moldes y la pieza mediante el software *Solid Works*. Los análisis se realizarán a partir de ellos mediante el programa *Marc Mentat*.

3.1. Parámetros de diseño

3.1.1. Descripción de los parámetros de diseño

De cara al estudio de comportamiento, son necesarios diversos factores propios de cada material. En este caso los factores más significativos que se van a utilizar son los siguientes:

- Módulo de elasticidad o módulo de Young (E). Se trata de un parámetro característico de cada material que relaciona los incrementos de tensión aplicados ($d\sigma$) con los incrementos de deformación longitudinal unitaria ($d\varepsilon$)

$$E = d\sigma/d\varepsilon \quad (3.1)$$

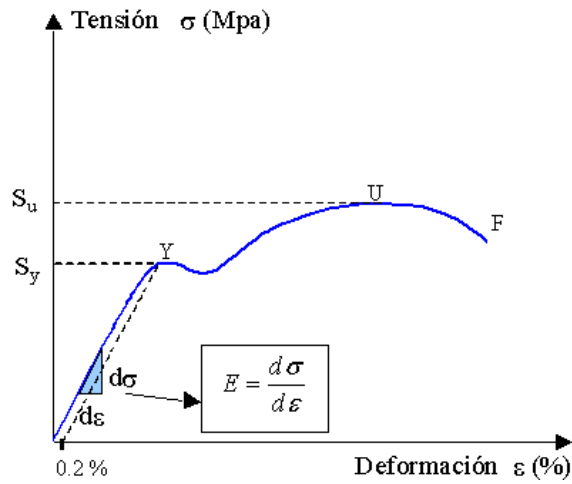


Figura 3.1: Módulo de elasticidad

- Módulo de elasticidad transversal o módulo de cizalladura (G). Parámetro característico de cada material que indica la relación entre la tensión cortante y la deformación angular en el material.

$$\tau = G * \gamma \quad (3.2)$$

$$G = E / (2 * (1 + \nu)) \quad (3.3)$$

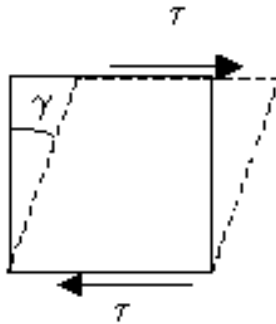


Figura 3.2: Módulo de cizalladura

- Coeficiente de Poisson (ν). Parámetro característico de cada material que indica la relación entre las deformaciones longitudinales que sufre el material en el sentido perpendicular a la fuerza aplicada y las deformaciones longitudinales en la

dirección de la fuerza. Considerando ϵ_x el alargamiento relativo en x y ϵ_y, ϵ_z el acortamiento relativo en y y en z relativamente se tiene que:

$$v = |\epsilon_y/\epsilon_x| = |\epsilon_z/\epsilon_x| \quad (3.4)$$

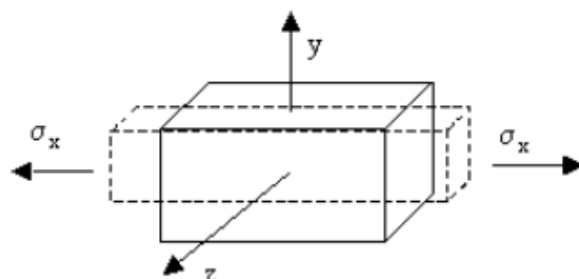


Figura 3.3: Coeficiente de Poisson

En el caso del estudio del molde o de la pieza con material isótropo, estos coeficientes tomarán un único valor, mientras que en el caso del material compuesto, al tratarse de un material ortótropo, tomarán diferentes valores en función de la dirección de estudio, se va a considerar una variación en las direcciones transversales frente a la longitudinal (perpendiculares y paralelas a la fuerza, respectivamente)

3.1.2. Parámetros de diseño seleccionados

Se han tomado los siguientes valores:

- Molde. Se toman moldes de acero.

Para la realización del molde, se toma un acero para herramientas de la serie F-500, en este caso, un acero indeformable al Cr-Mn F-522. Suele ser utilizado para matrices. Cuenta con elevada dureza y gran resistencia al desgaste así como buena estabilidad térmica.

Calidad									Templado
	C	Mn	Si	Cr	W	V	Recocido	Templado	Revenido
F-522	0,95	1,10	0,25	0,60	0,60	0,15	180/220 HB	62/64 HRC	59/61 HRC

Figura 3.4: Composición del acero F-522

Se toma un **módulo de elasticidad, E , de $210000MPa$** y un **módulo de Poisson, ν , de $0,3$**

- Pieza para el estudio del molde. Se toma una plancha de aluminio, considerando que cualquier material compuesto va a ejercer menos resistencia a ser deformado que el aluminio. De esta forma, se asegura que el molde va a resistir todos aquellos esfuerzos a los que podría estar sometidos y aplicando un factor de seguridad considerable.

En este caso, se utiliza un **módulo de elasticidad, E , de $70000MPa$, un límite elástico de $250MPa$ y un módulo de Poisson, ν , de $0,3$. Además, se comporta según la Ley de endurecimiento que se puede observar en la Figura 3.5.**

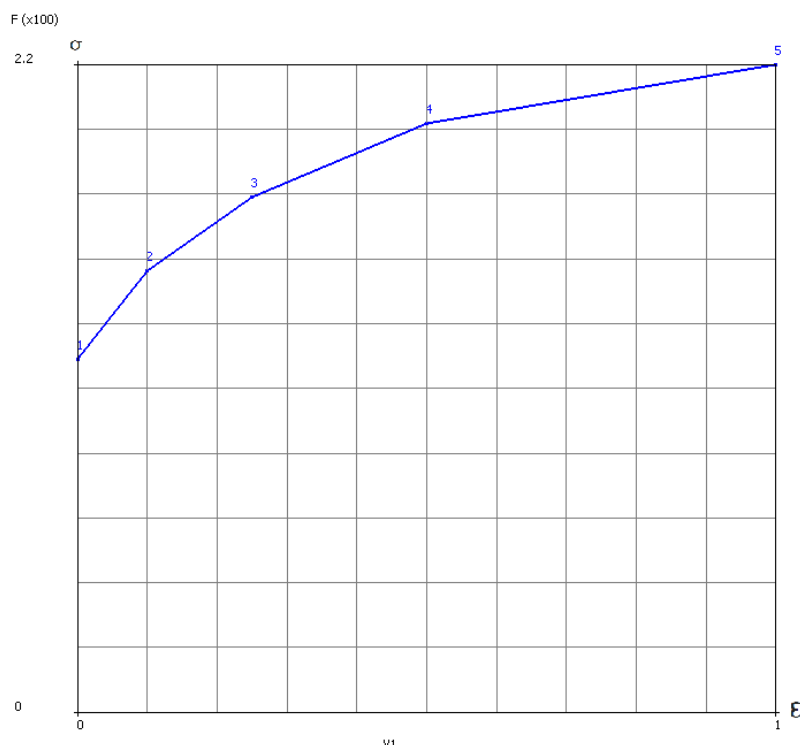


Figura 3.5: Ley de endurecimiento del aluminio

- Pieza para el estudio de comportamiento de la misma. Se toma una plancha de resina epoxi, como las nombradas en el apartado 2.3.2 de este mismo documento, reforzada con fibra de vidrio.

En este caso, la adición de fibras cortas supone una reducción en la deformación, mientras que las fibras largas son más eficientes en términos de refuerzo mecánico. Se considera un material compuesto con un contenido en fibra larga del 60% . [9]

Las propiedades de el material compuesto, así como las de sus constituyentes por separado, se pueden observar en la Figura 3.6. En esta figura se muestran los parámetros principales necesarios para el análisis, y en todos los casos se tienen los valores en sistema internacional.

Material	Properties	Symbol	Value
Glass Fiber	Elasticity Modulus	E_f	$76.00 \times 10^9 \text{ Pa}$
	Density	ρ_f	$2.56 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
	Poisson's coefficient	ν_{12f}	0.22
Epoxy resin	Elasticity Modulus	E_m	$4.00 \times 10^9 \text{ Pa}$
	Density	ρ_m	$1.30 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
	Poisson's coefficient	ν_m	0.40
Laminae (orthotropic)	Elasticity Modulus Fiber direction	E_{11}	$44.8 \times 10^9 \text{ Pa}$
	Normal to fiber	$E_{22} = E_{33}$	$11.27 \times 10^9 \text{ Pa}$
	Density	ρ_c	$1780 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
	Shear Modulus	$G_{12} = G_{13}$	$4.86 \times 10^9 \text{ Pa}$
		G_{23}	$4.45 \times 10^9 \text{ Pa}$
	Poisson's coefficient	ν_{12}	0.28
	Fiber volume fraction	V_f	60%

Figura 3.6: Propiedades del material compuesto

3.2. Diseño de los moldes

Para poder realizar los análisis, se parte de los diseños en 3D realizados con *Solid Works*. De este modo se tiene el siguiente conjunto:

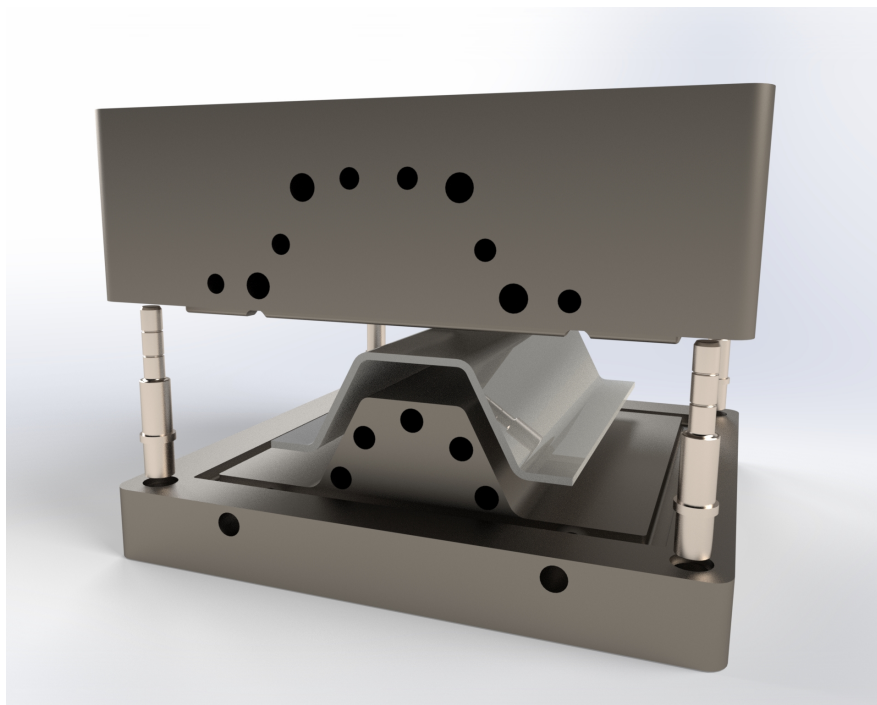


Figura 3.7: Vista modelo 1

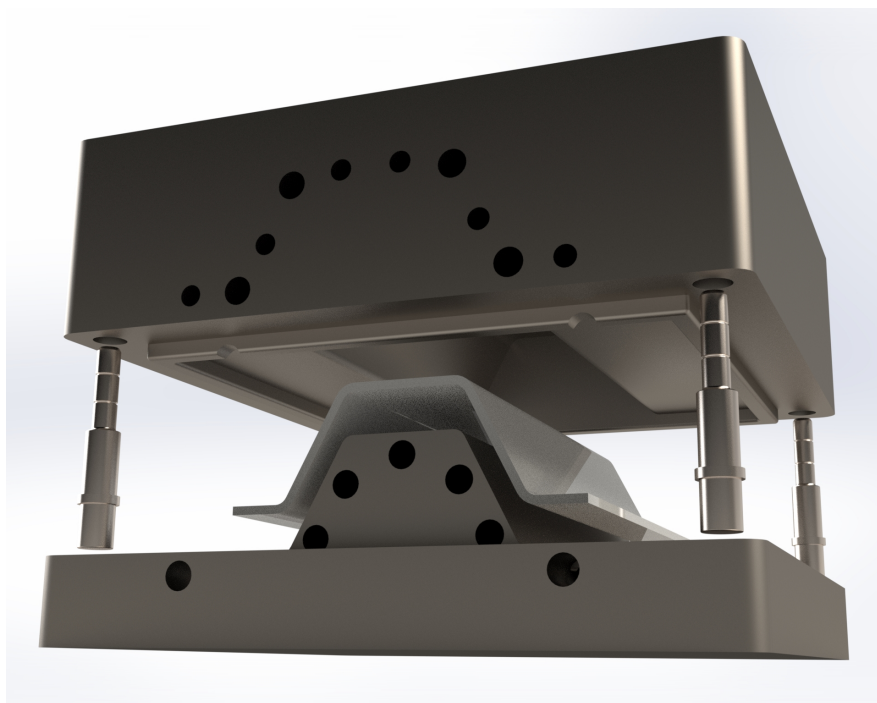


Figura 3.8: Vista modelo 2



Figura 3.9: Vista modelo 3

El conjunto que se ve en las imágenes anteriores cuenta con varias partes:

- Molde superior. Este molde cuenta con orificios para introducir las resistencias necesarias para alcanzar y mantener las temperaturas óptimas de trabajo. Además, cuenta con conductos para una correcta refrigeración de las piezas y del propio molde.
Del mismo modo, cuenta con unos agujeros pasantes a través de los cuales se insertarán las columnas guías que conseguirán que el molde no se descentre en el proceso de conformado.
- Molde inferior. En este caso se tienen orificios para introducir resistencias para alcanzar las temperaturas necesarias y, al igual que el otro molde, cuenta con orificios para los centradores.
- Pieza. Se trata de una pieza con la forma que obtendría con estos moldes.
- Alineadores. Se tratan de cuatro columnas guías que permiten el correcto centrado de los moldes a la hora de conformar las piezas.

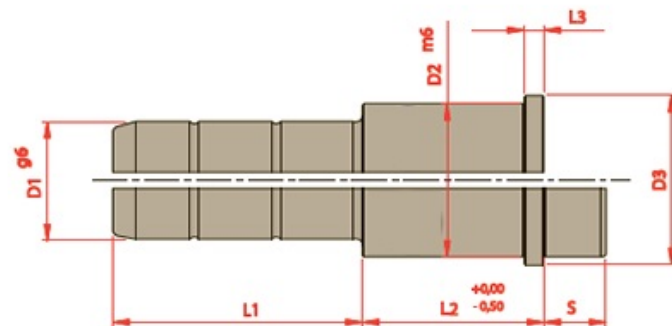


Figura 3.10: Columna guía



Figura 3.11: Datos de la columna guía

Las medidas necesarias para un correcto funcionamiento en estos moldes son las siguientes:

- D1. Debe ser inferior al diámetro de los orificios del molde superior pensados para ello, en este caso se toman 5,5 mm.
- D2. Debe coincidir, con cierta tolerancia, con el diámetro de los orificios del molde superior, siendo levemente superior a D1, es decir, 8 mm.
- D3. Debe coincidir, con cierta tolerancia, con el diámetro superior de los orificios del molde inferior, siendo por tanto 9,5 mm.
- L1. Debe ser suficiente para que ambos moldes queden fijados en todo momento, es decir, 20 mm.

- L2. Se considera una longitud de 15 mm.
- L3. Se consideran 2 mm.
- s. Se trata de la parte que va a estar introducida en el molde inferior. Se consideran 10 mm.
- Refrigeración. Se tiene líquido refrigerante recorriendo los conductos del molde superior destinados a dicho fin para enfriar las piezas y los propios moldes.
- Prensa. En función de los valores de carga necesarios obtenidos en el siguiente apartado, se elegiría una prensa acorde a los requerimientos. Al tratarse de unas piezas relativamente pequeñas, la mayoría de prensas aportarían unas cargas superiores a las necesarias; en este caso, se podría tomar una lo más pequeña y próxima a los valores obtenidos posible y contar con cierto sobredimensionamiento, o se podrían tomar una prensa mayor y conformar varias piezas al mismo tiempo.
- Resistencias calefactadas. Son las encargadas de elevar la temperatura hasta la temperatura apropiada para el proceso. Se toman unas resistencias comerciales de la casa BrotoTermic.

De entre todas las resistencias disponibles en catálogo se toman las de dimensiones:

- Diámetro. Se toman resistencias de diámetro 6,5 mm.
- Longitud. Se toman de 125 mm de largo.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL UTILLAJE

Modelos según catálogo: 841


GRUPO 8 - Resistencias tipo cartucho

8.1 - Cartuchos calefactores eléctricos de alta densidad calorífica TH

CARTUCHOS CALEFACTORES ELÉCTRICOS DE ALTA DENSIDAD CALORÍFICA "TH", MODELOS EN mm.

Características generales

- Tubo en acero inoxidable AISI 321 rectificado y calibrado, fondo soldado, estanco hasta una presión de 60 Kg/cm²
- Resistencia de hilo de Níquel-Cromo 80-20, punto de fusión de 1400 °C
- Aislamiento con óxido de magnesio electrofundido muy compactado.
- Conexiones mediante rabillos de trenzado de níquel, recubiertos con fibra de vidrio siliconada, engrampados con terminal tubular inox sobre los hilos de níquel que salen del cartucho, de 250 mm de longitud excepto los del termopar que son de 1000 mm.
- Zonas frías: Según diámetro, 6 a 12 mm por el lado de la conexión, y entre 4 y 8 mm por el lado del fondo soldado
- Tensión normalizada ~230 V.
- Bajo pedido pueden fabricarse cartuchos calefactores a medida según sus especificaciones:
 - Diámetros
 - Longitudes
 - Conexiones: Partiendo de los hilos de níquel que salen del cartucho pueden realizarse diferentes ejecuciones como regletas de conexión fijas, cables especiales, acodar la conexión, conexiones estancas, etc.
 - Todos los cartuchos pueden suministrarse con un termopar Fe-Co incorporado.



Diámetro en mm	Longitud en mm	Wattios					Con termopar Fe-Co incorporado
6,5	40		100	125	160-175	200	100
	50		100	160	200	250	200
	60		125	200	250	315	
	80	125	180	280	350		
	100	160	220	350			350
8	40		100	160	200	250	
	50		125	200	250	315	
	60	100	140	220	280	350	
	80	160	200	315	400		
	100	180	280	400			
10	130	250	400				
	40	100	125	200	250	315	200
	50	100	160	250	315	400	250
	60	125	180	315	400	500	400
	80	160	250	400	500	630	250
12,5	100	220	350	560	700	850	
	130	315	500	800			
	160	400	630				400
	40	100	160	250	315	400	
	50	100	200	315	400	500	
16	60	125	200	315	400	500	
	80	200	315	500	630	800	
	100	250	400	630	800	1000	
	130	400	630	1.000	1250		
	160	500	800	1.250			
20	200	630	900				
	40	100	100	250	315	400	
	50	160	250	400	500	630	
	60	160	250	400	500	630	
	80	280	400	630	800	1000	
20	100	350	500	800	1000	1250	
	130	500	700	1.100	1400	1800	
	160	630	900	1.600	1800		
	200	800	1250	2.000			
	250	1000	1600				
20	300	1250	1800				
	60	200	315	500	630	800	
	80	350	500	800	1000	1250	
	100	450	630	1.000	1400	1600	
	130	630	900	1.400	1800	2200	
20	160	800	1100	1.800	2200		
	200	1000	1600	2.500			
	250	1250	2000				
	300	1600	2200				
Densidad calorífica		8 a 11 W/cm ²	12 a 19 W/cm ²	20 a 24 W/cm ²	25 a 29 W/cm ²	30 a 35 W/cm ²	

Tolerancias

- Diámetro: -0,02 mm
- 0,08 mm
- Longitud: Hasta 130 mm → ± 2 mm
- Desde 160 mm → ± 1,5% de la longitud total




Figura 3.12: Resistencias calefactadas

3.3. Ensayos

3.3.1. Ensayo del molde en 2D

En primer lugar, se realiza un ensayo en dos dimensiones de los moldes deformando una plancha de aluminio. De este modo, se puede obtener la fuerza necesaria para deformarla y la fuerza máxima que aparecería en el conjunto, con la cual se podrá analizar posteriormente si los moldes serán capaces de soportarla o no.

Este ensayo se realiza con una plancha de aluminio debido a que cualquier estudio realizado con un material compuesto va a conllevar consigo unas cargas máximas mucho menores. De esta manera, se puede asegurar que los moldes van a poder soportar todos las exigencias a las que van a estar sometidos.

Para realizar el ensayo se parte del siguiente diseño en dos dimensiones:

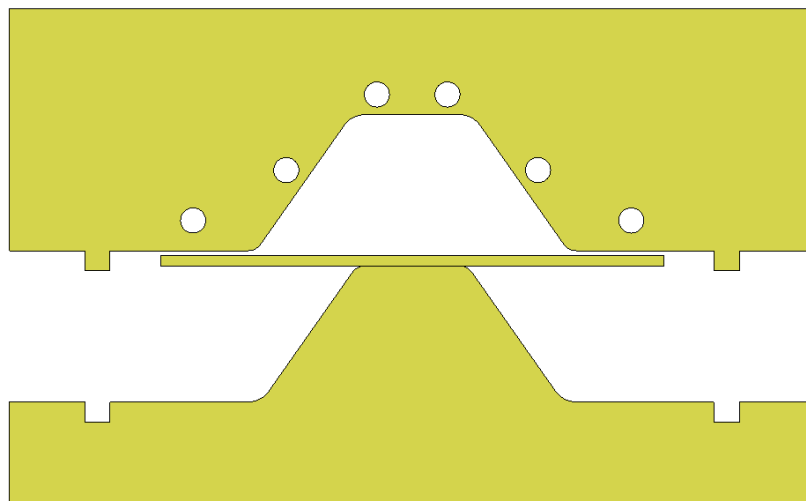


Figura 3.13: Diseño 2D

Se puede observar que hay ciertos orificios en el molde destinados a refrigeración o calentamiento. De esta manera, se obtiene la fuerza necesaria para el conformado de la pieza sin que afecten las posibles variaciones en el molde, que al tener un valor de resistencia muy superior al de la lámina, van a ser mínimas.

Para el análisis se realiza el siguiente mallado:

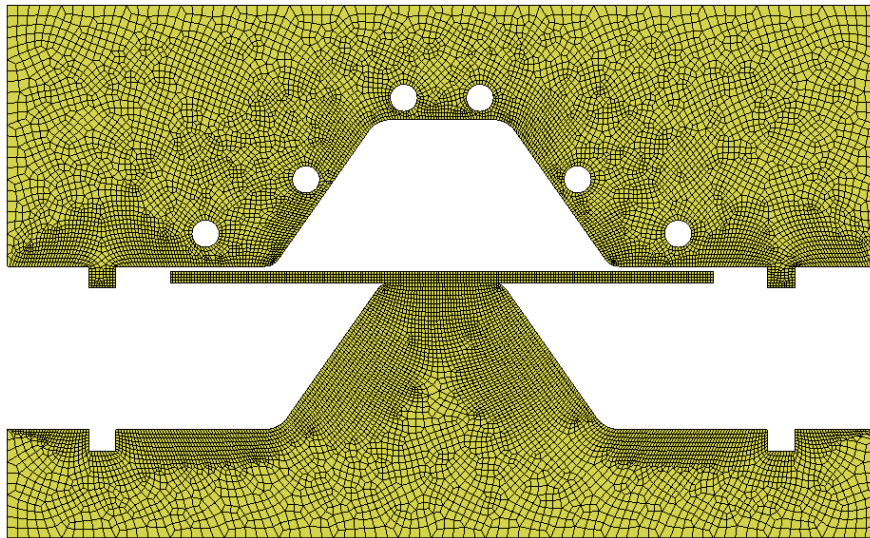


Figura 3.14: Malla 2D

Este mallado está realizado de manera que en las zonas más críticas, como son los bordes de los moldes y la pieza, haya un mayor número de elementos para que de esta forma quede lo mejor recogido posible el comportamiento del sistema.

Esto es especialmente importante en la lámina, ya que va a sufrir grandes deformaciones y para que la simulación sea lo más correcta posible es necesario que los elementos sean lo más pequeños posibles, recogiendo un gradiente de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos más precisos. Además, de este modo se evita posibles penetraciones de unos elementos con otros durante el análisis que podrían conllevar a errores en la simulación.

Realizando este mallado se obtienen 800 elementos para la lámina, 7696 elementos para el molde superior y 5547 elementos para el inferior.

Para el correcto funcionamiento de la simulación, es necesario introducir una tabla de contactos, en la que se estipula qué partes están en contacto y cuáles no como se puede apreciar en la Figura 3.15.

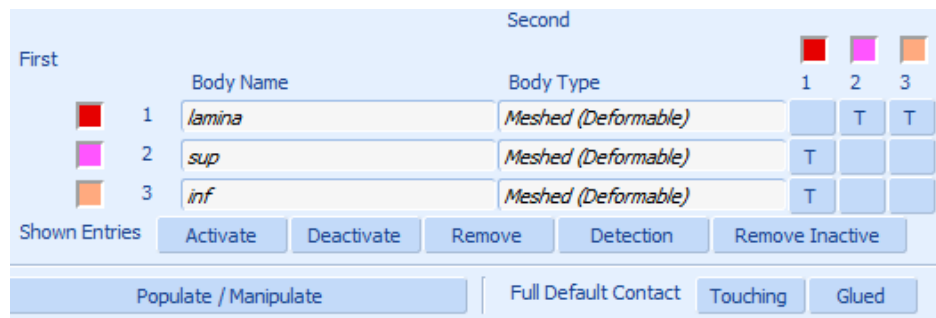


Figura 3.15: Contactos 2D

De la misma manera, es necesario introducir las cargas y apoyos con los que va a contar la simulación.

Para ello, se introduce la restricción de desplazamientos en la cara inferior del molde inferior, de forma que éste no puede moverse de su emplazamiento inicial. Esto se puede observar en la Figura 3.16 representado con flechas magentas en cada nodo con restricción.

Del mismo modo, para simular el movimiento se introduce un desplazamiento en los nodos superiores del molde superior. En este caso, entra en juego un desplazamiento de -28 mm en el eje Y regido por una gráfica lineal de tiempo en el que se estipula que el movimiento es uniforme y en un intervalo temporal de un segundo. Esto se puede observar en la Figura 3.17 representado por flechas magentas en cada nodo a los que se les aplica las condiciones para el desplazamiento.

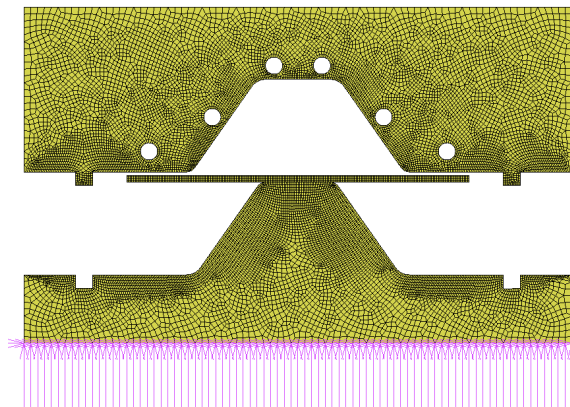


Figura 3.16: Fijación molde 2D

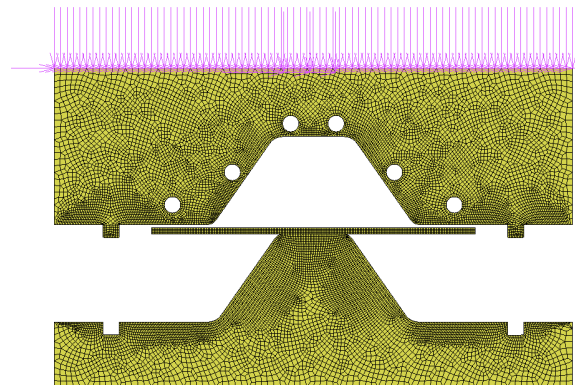


Figura 3.17: Fuerza en molde 2D

Se considera que la simulación se efectúa de manera isoterma.

Se realiza el análisis y se obtienen los siguientes resultados:

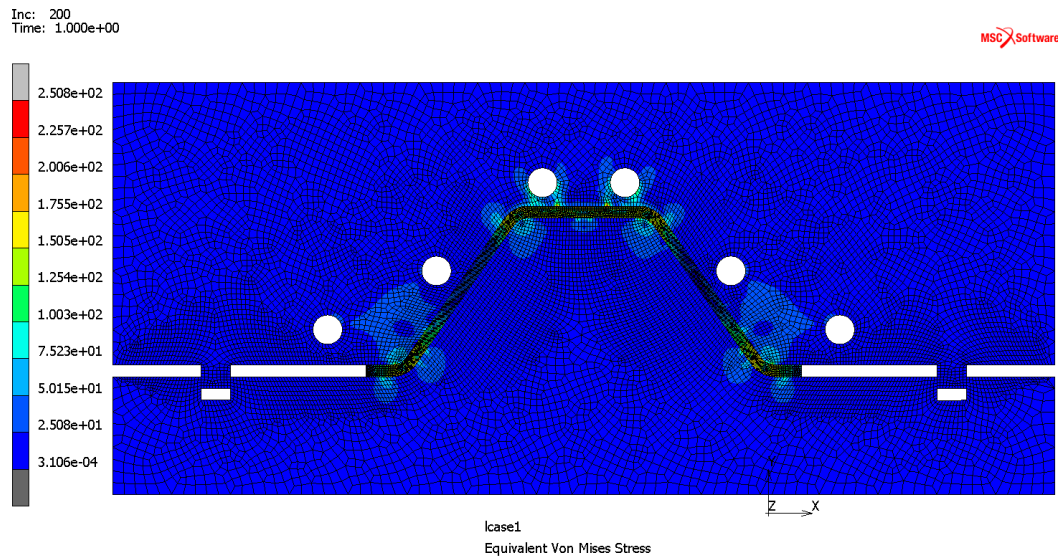


Figura 3.18: Tensiones equivalentes de *Von Mises* análisis 2D con malla

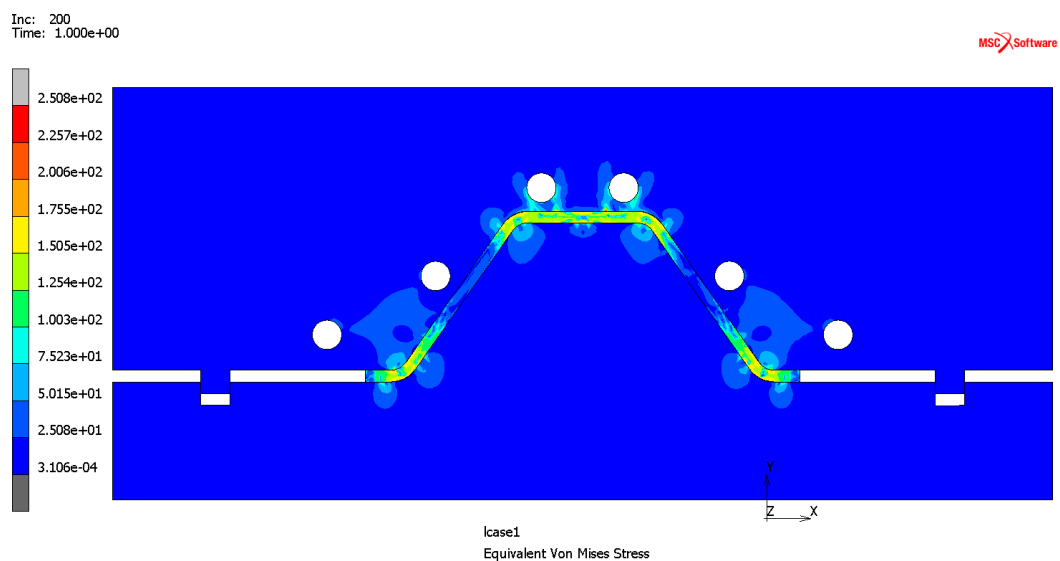


Figura 3.19: Tensiones equivalentes de *Von Mises* análisis 2D sin malla

Se puede observar que las tensiones presentes son bastante simétricas respecto del plano de central de simetría. Del mismo modo se puede observar que las zonas de mayor sufrimiento para la pieza son en las zonas de giro y es en dichos puntos donde se acumulan las tensiones mayores, mientras que las zonas laterales de la pieza que no sufren deformación, apenas están sometidas a tensiones. Se obtienen unas tensiones máximas de 250,8 MPa.

Además, se obtiene la gráfica que recoge las fuerzas que experimenta el sistema en función del tiempo y que se puede observar en la Figura 3.20.

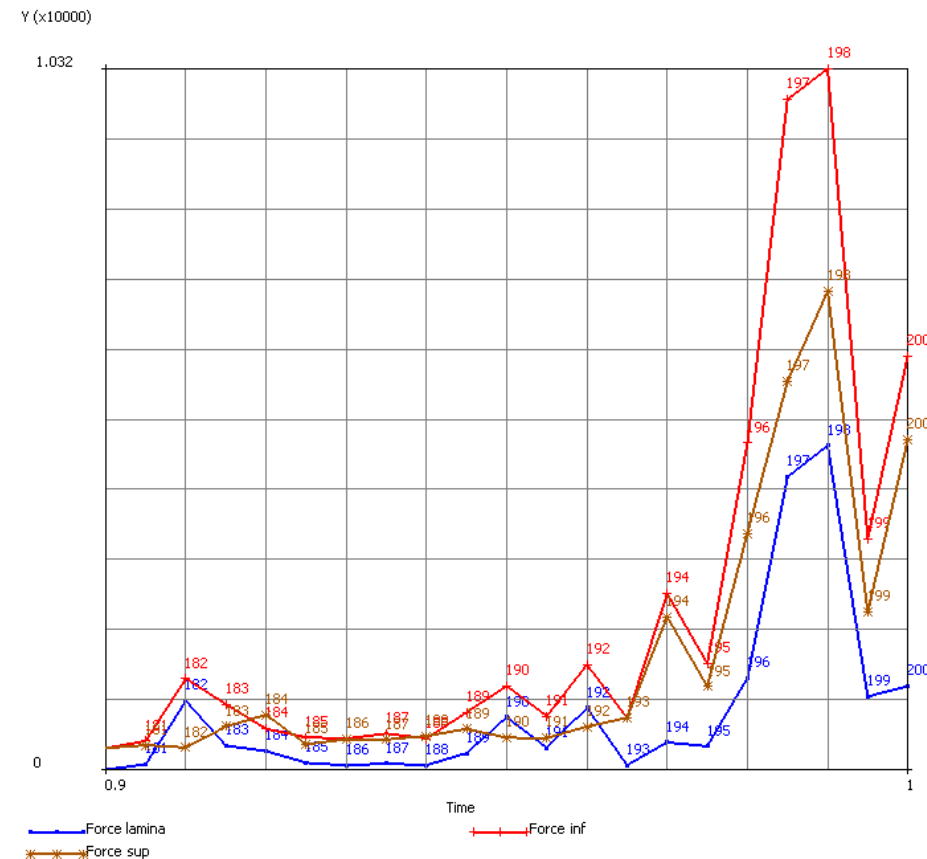


Figura 3.20: Gráfica de fuerzas experimentadas

En este caso, interesa saber la carga máxima a la que va a estar sometido el molde inferior ya que, debido a la geometría del mismo, se considera que será el que más va a sufrir en el proceso de conformado.

De este modo, y observando la Figura 3.20, se tiene una fuerza máxima de 10320 N, que serán los utilizados en el siguiente ensayo en 3D del molde para comprobar el aguante del mismo.

Además, se puede observar que la fuerza máxima se da en el último momento del ensayo, esto es debido a que toda la fuerza ejercida en el último instante por la prensa la absorben los moldes, mientras que en los instantes anteriores va destinada a la deformación de la pieza.

Es necesario multiplicar la fuerza máxima obtenida en la sección del sistema de 2 dimensiones por 120, que es la profundidad total que tiene el molde. De esta forma, se

obtiene la fuerza máxima que experimenta la matriz inferior total.

$$F_{(max)} \times b = 1,032 \cdot 10^4 \times 120 = 1238400 \text{ N} \quad (3.5)$$

Esta fuerza obtenida será la que se utilizará en el ensayo del molde, repartida entre todos los nodos a los que afecte.

3.3.2. Ensayos del molde en 3D

Mallado automático lineal (TET4)

Este ensayo se realiza para comprobar si los moldes van a ser capaces de soportar los esfuerzos a los que van a estar sometidos.

Se considera que el que más va a sufrir es el molde inferior, por su geometría. Es por esto que el análisis se va a realizar únicamente sobre ese molde.

En este caso, el ensayo va a tener ciertas componentes diferentes al ensayo anterior. En primer lugar, se trata de un análisis en 3 dimensiones con el que se van a comprobar las zonas más débiles de la matriz y las tensiones y deformaciones que esta experimenta durante un conformado de pieza, mientras que en el caso anterior se pretendía calcular la fuerza máxima necesaria que aparece para conformar la pieza. De este modo, no se va a tener como condición de carga ningún tipo de desplazamiento, sino que se va a utilizar la fuerza máxima obtenida en el ensayo anterior y que se puede comprobar en la Figura 3.20.

Para poder utilizar la fuerza obtenida en el ensayo anterior, como ya se ha visto en la Ecuación 3.5, es necesario multiplicarla por los 120 mm de profundidad que tiene el molde, ya que lo obtenido es únicamente en el sistema de 2 dimensiones analizado, con lo que se obtiene una fuerza de **1238400 N**.

Teniendo esto en cuenta, se procede al análisis del siguiente molde:

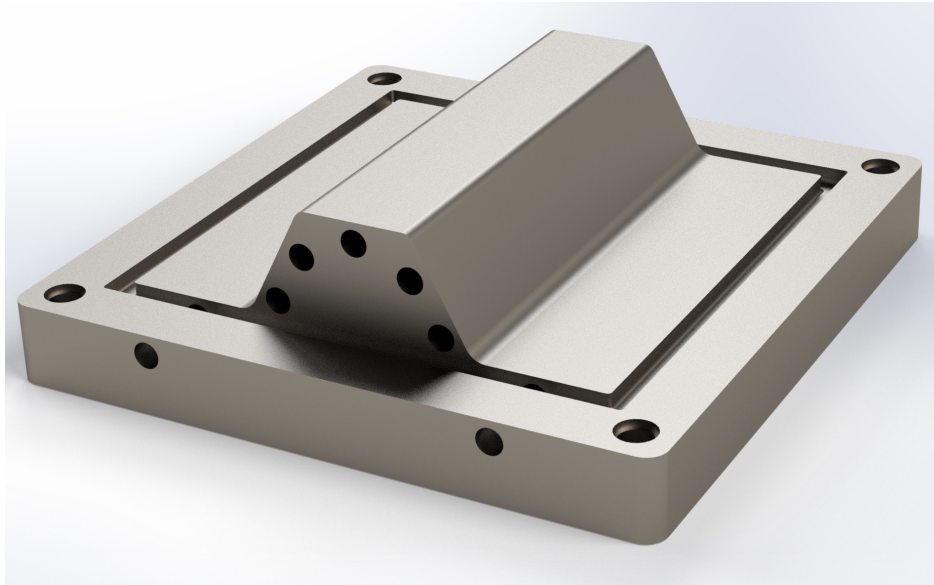
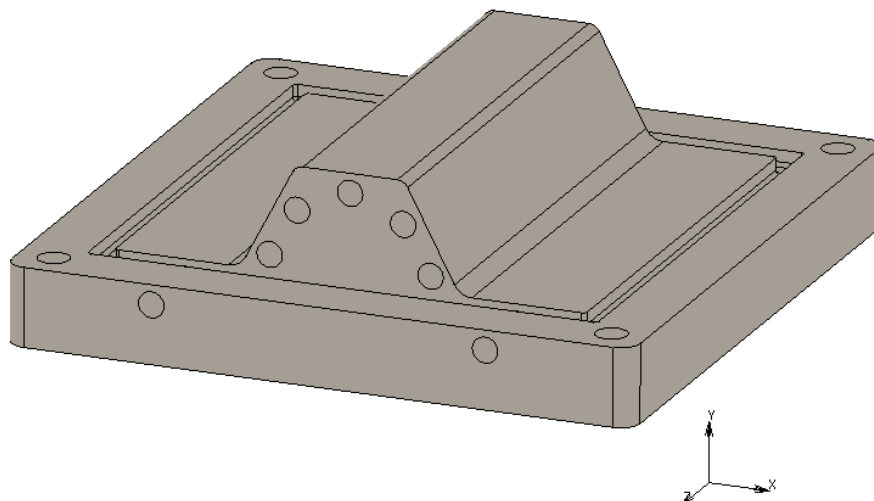


Figura 3.21: Molde de ensayo

Se puede observar que cuenta con diversos orificios. Estos están pensados para albergar en su interior las resistencias necesarias para calentar el molde y los conductos de refrigeración.

En primer lugar, se introduce el sólido a *Marc Mentat*, obteniéndose lo siguiente:

Figura 3.22: Molde de ensayo en *Marc Mentat*

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL UTILLAJE

A continuación se procede a realizar un primer mallado general a partir del cual se quiere comprobar, a *grosso* modo, qué zonas van a ser las que más van a sufrir para poder optimizar el mallado y que quede recogido el comportamiento del molde lo mejor posible, sobre todo en las zonas más críticas. Se trata de un mallado con elementos tipo TET4, cuya geometría es tetraédrica con 4 nodos cada uno.

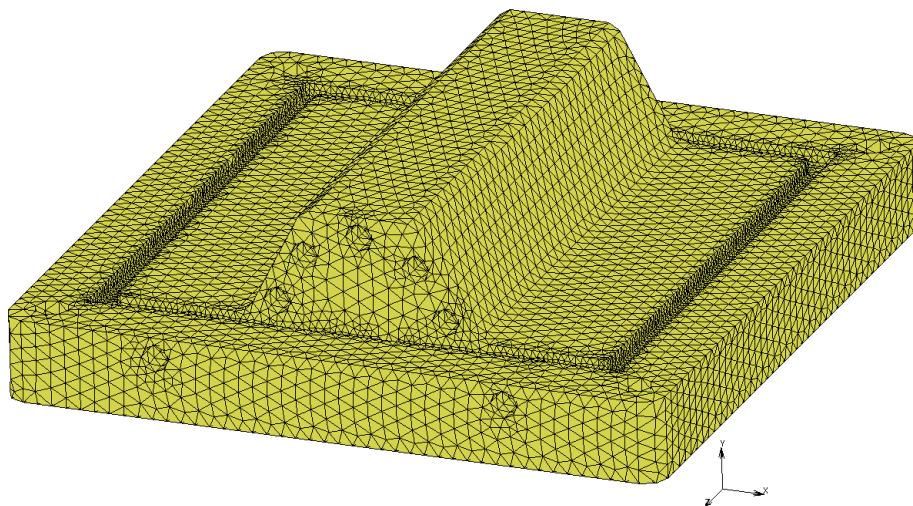


Figura 3.23: Mallado inicial del molde en 3 dimensiones

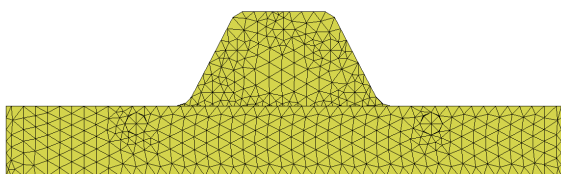


Figura 3.24: Malla inicial frontal

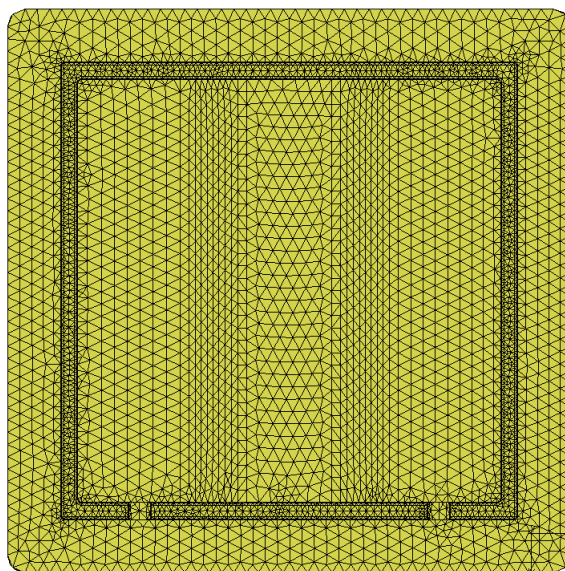


Figura 3.25: Malla inicial superior

De esta forma, se obtiene una malla con 114328 elementos (tetraedros lineales) y 25119

nodos.

Posteriormente, se procede a introducir todos los parámetros necesarios para el análisis. En este caso, se toma como material el acero, con un módulo de Young de 210000 MPa y un módulo de Poisson de 0,3.

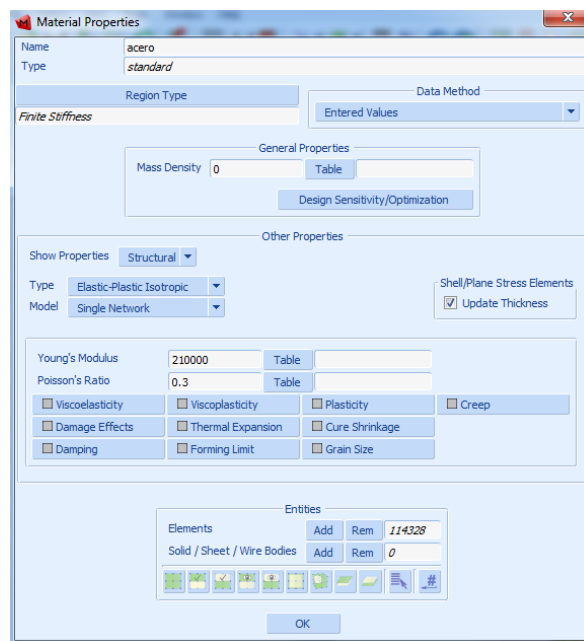


Figura 3.26: Material del molde

En este caso, es necesario aplicar dos condiciones de contorno al sistema, que se pueden observar en las Figuras 3.27, 3.28, 3.29 y 3.30

La primera de ellas fuerza a que los nodos inferiores del molde no puedan desplazarse en ninguna de las tres direcciones y mediante la segunda condición se introduce al sistema la fuerza máxima ejercida por la chapa a conformar durante el proceso, para ello se ha introducido la carga en todos aquellos nodos que están en contacto con el molde en el instante final del proceso de conformado y se ha repartido a partes iguales en cada uno de ellos la carga total que actúa.

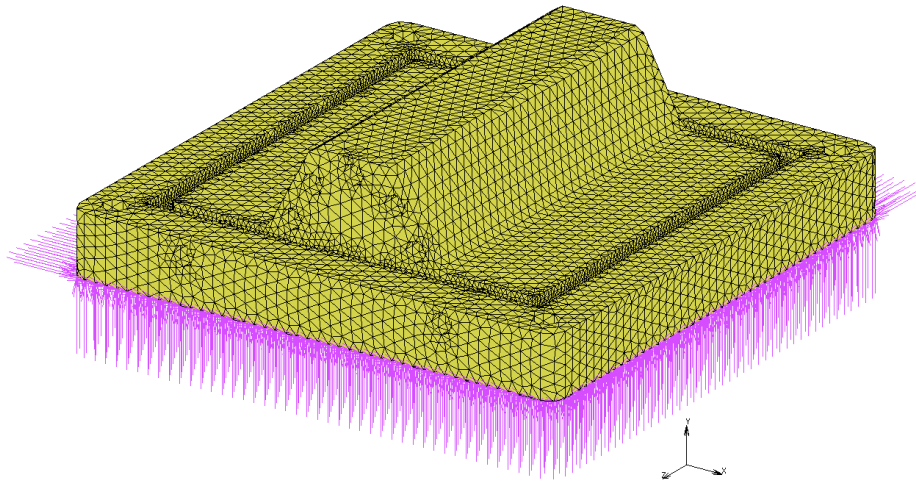


Figura 3.27: Apoyos para el molde en 3D

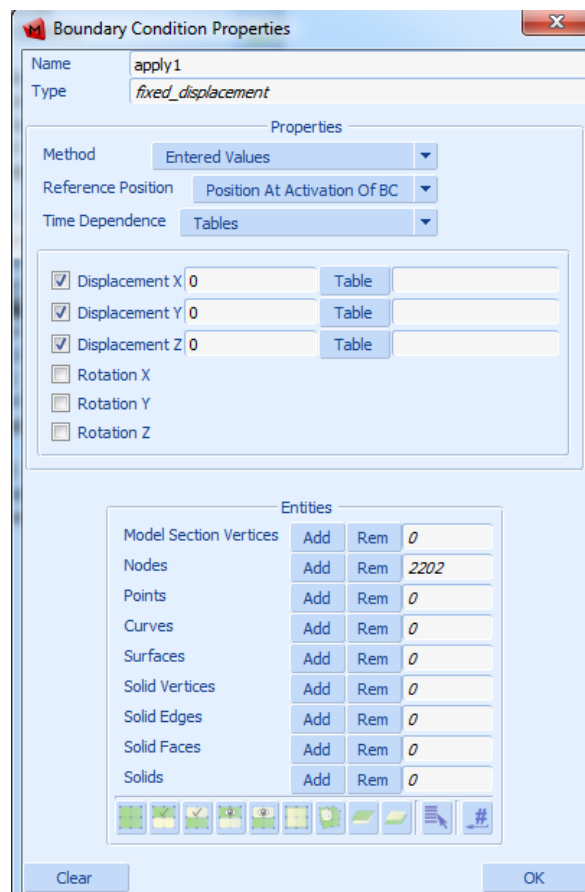


Figura 3.28: Valores de fijación

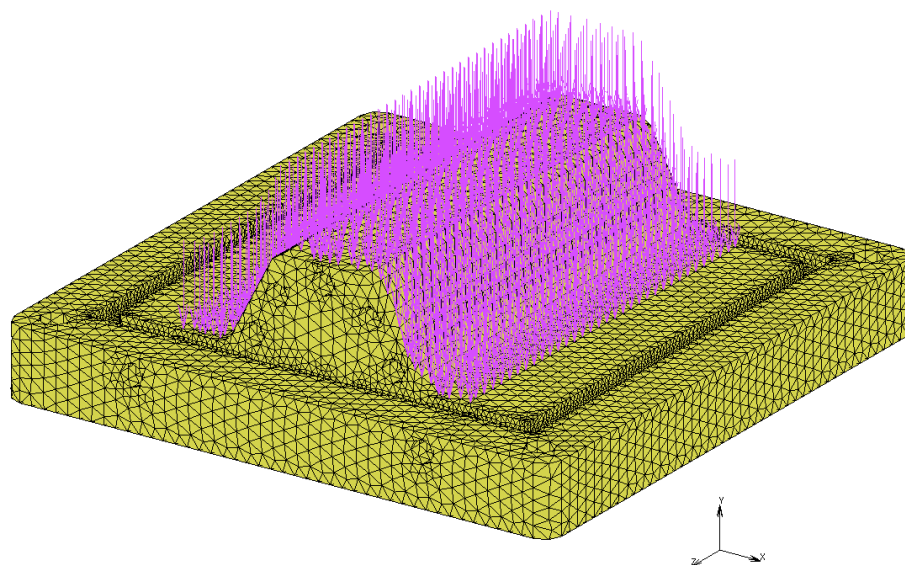


Figura 3.29: Cargas aplicadas al molde en 3D

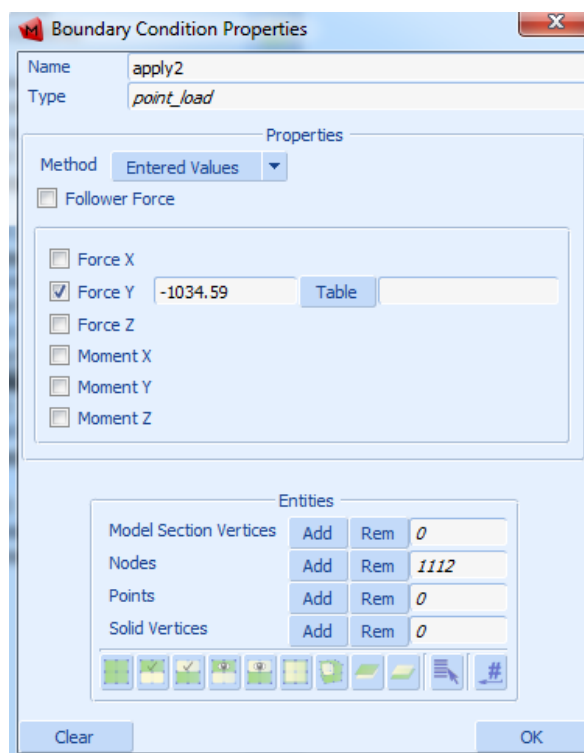


Figura 3.30: Valores de carga

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL UTILLAJE

A diferencia del ensayo anterior, en el caso de carga se va a utilizar un único paso de cálculo. Esto se debe a que al no haber grandes deformaciones ni desplazamientos, no va a haber penetración de unos elementos con otros por lo que no va a ser necesario realizar varios cálculos secuenciales para obtener un resultado lo más fiel a la realidad posible.

Con estos datos se obtienen los siguientes resultados de tensión equivalente de *Von Mises*

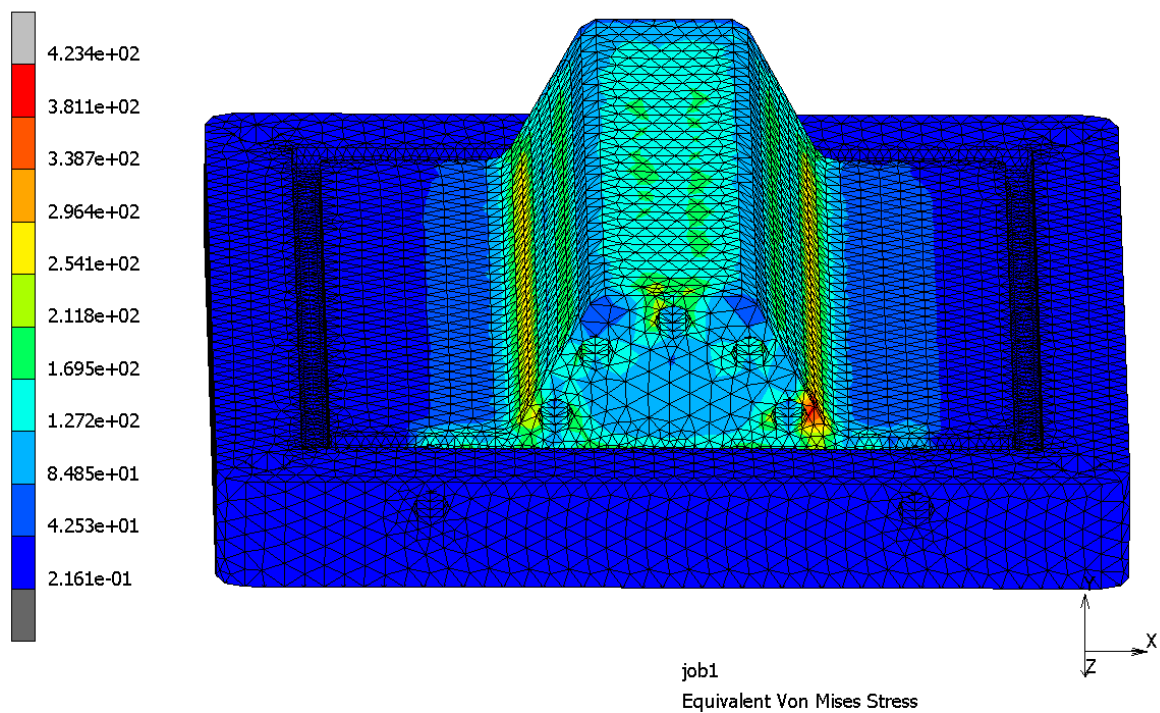
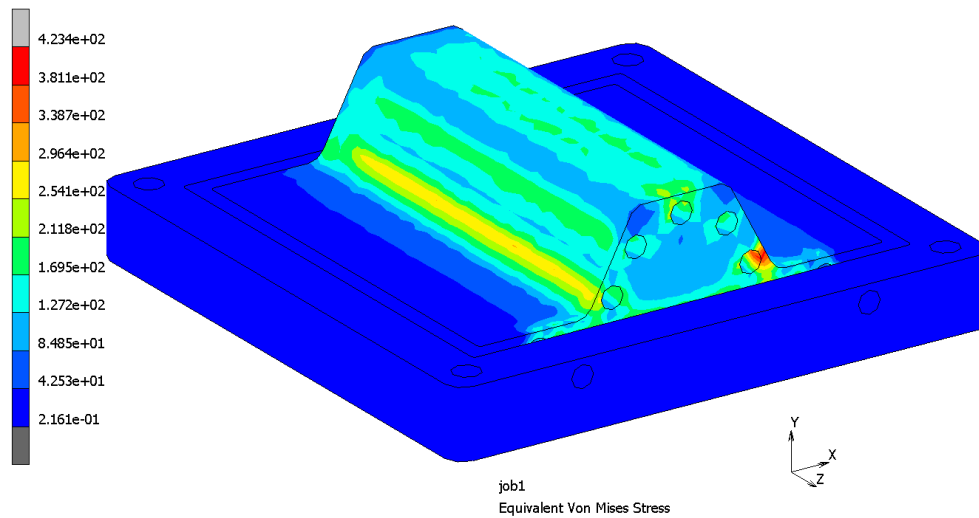
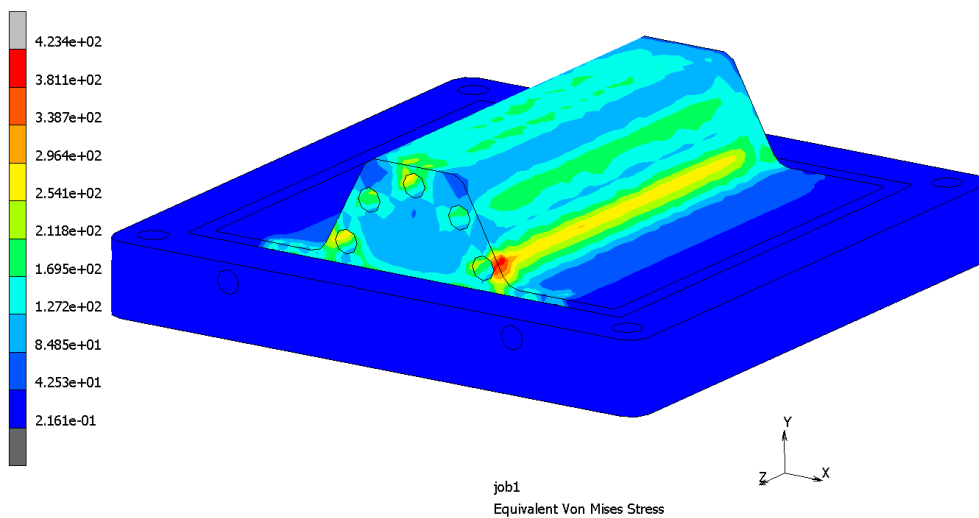


Figura 3.31: Tensiones de *Von Mises* con mallado inicial

Figura 3.32: Tensiones de *Von Mises* sin visualización de mallado inicialFigura 3.33: Tensiones de *Von Mises* sin visualización de mallado inicial

En primer lugar, se puede observar en las Figuras 3.31, 3.32 y 3.33 que las tensiones no son totalmente simétricas, esto puede ser debido a que al tratarse de un mallado lineal con elementos relativamente grandes, la exactitud de los resultados no es muy alta ya que los valores que aparecen en cada elemento abarca una porción lo suficientemente grande como para que se dé un gradiente de tensiones considerable y, además, no se trata de un mallado totalmente simétrico.

Otra de las razones por la que puede no dar resultados simétricos es que se dan ciertas

desviaciones en los resultados debido a los cálculos y aproximaciones que realiza el programa para realizar la simulación.

Además, también puede ser debido a que la carga vertical no se encuentre distribuida de una forma totalmente simétrica. En este caso, podría encontrarse ejercida levemente desplazada hacia la derecha.

Viendo los resultados se puede considerar que las partes más críticas del molde durante el proceso de conformado se encuentran en las zonas de espesor bajo generadas por los orificios para las resistencias y la refrigeración. En esta ocasión, se obtienen unas tensiones máximas de 423,4 MPa

Mallado cuadrático automático (TET10)

A partir de los resultados anteriores se procede a hacer un segundo mallado para tratar de obtener unos resultados más precisos. En esta ocasión, se realiza una malla cuadrática automática como se puede ver en la Figura 3.34

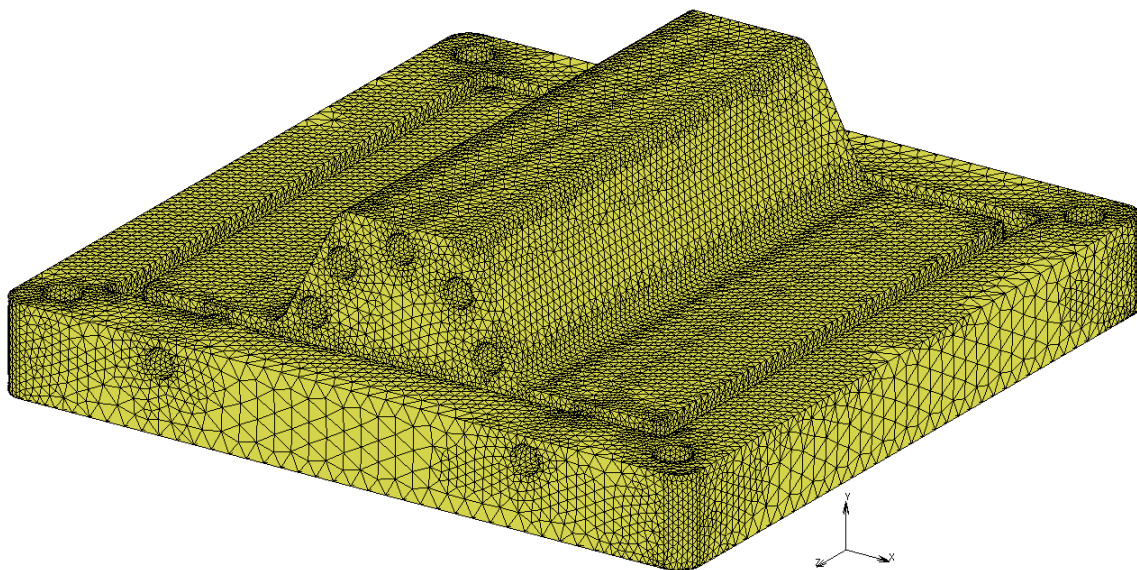


Figura 3.34: Mallado cuadrático del molde en 3 dimensiones

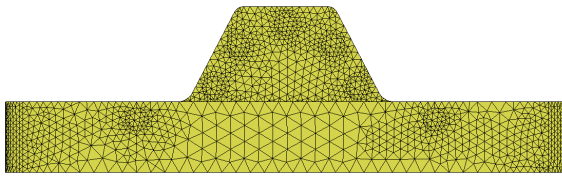


Figura 3.35: Malla cuadrática frontal

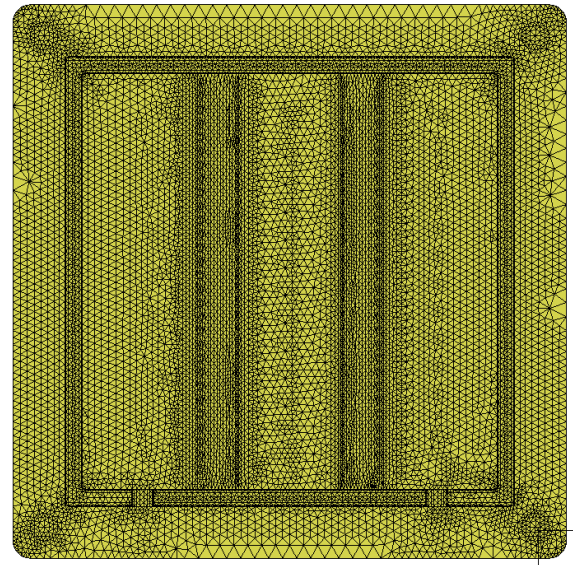


Figura 3.36: Malla cuadrática superior

Este mallado cuenta con elementos tipo TET10 ya que toman forma tetraédrica con 10 nodos cada uno. A diferencia de la malla lineal realizada anteriormente, permite que las aristas de los elementos puedan ser curvas, lo que añade precisión en las zonas de los orificios como se puede ver en las Figuras 3.37 y 3.38.

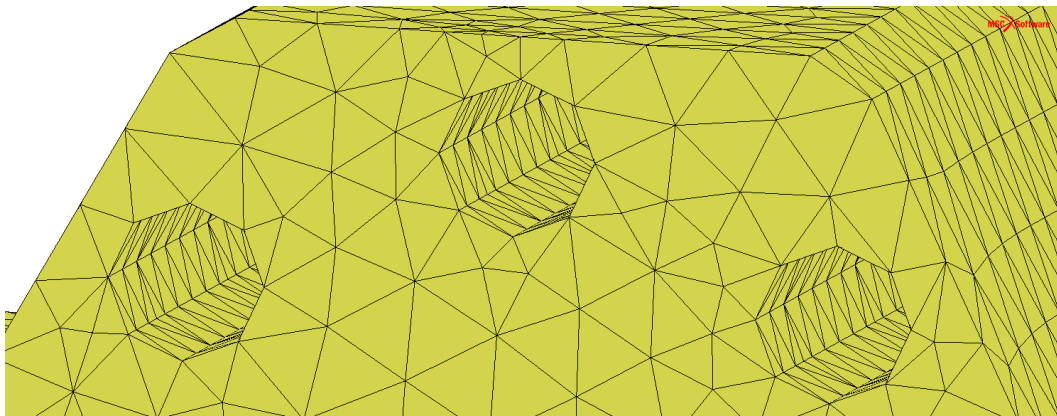


Figura 3.37: Orificios con mallado lineal

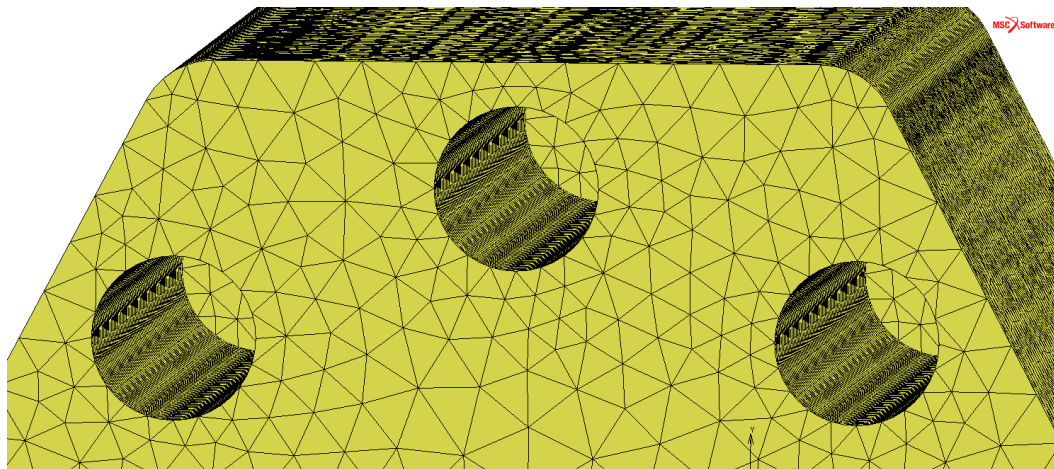


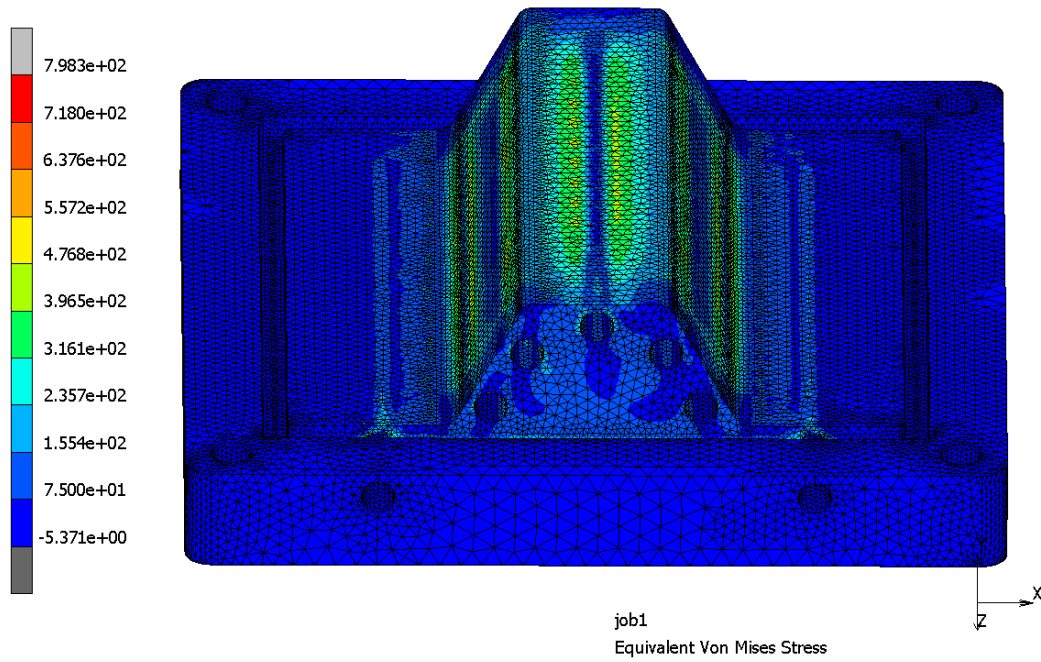
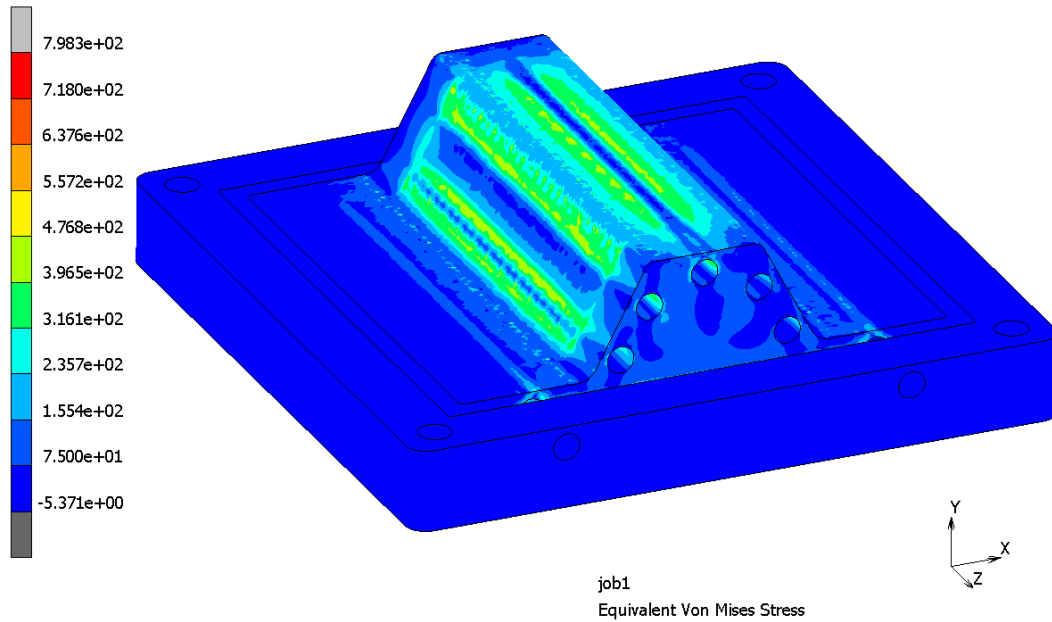
Figura 3.38: Orificios con mallado cuadrático

Además, con este tipo de mallado, se incrementan considerablemente el número de nodos existentes ya que estos aparecen también en los centros de todas las aristas en lugar de únicamente en los vértices de los elementos, lo que produce un incremento en el tiempo de procesamiento y en la complejidad de cálculos.

Además de todo esto, se han tomado elementos con unas dimensiones menores para que la precisión sea mayor.

Con todo esto, se obtiene un mallado con 544664 nodos y 363953 elementos (tetraedros cuadráticos) frente a los 25119 y 114328 respectivamente del caso anterior. De esta manera, se tiene que mientras que los elementos se han triplicado, los nodos se han multiplicado por aproximadamente 20. Con todo esto, es lógico pensar que los resultados van a contar con una mayor precisión que en el caso anterior.

Con este mallado, se obtienen las siguientes tensiones de *Von Mises*:

Figura 3.39: Tensiones de *Von Mises* con mallado cuadráticoFigura 3.40: Tensiones de *Von Mises* zona izquierda sin visualización de mallado cuadrático

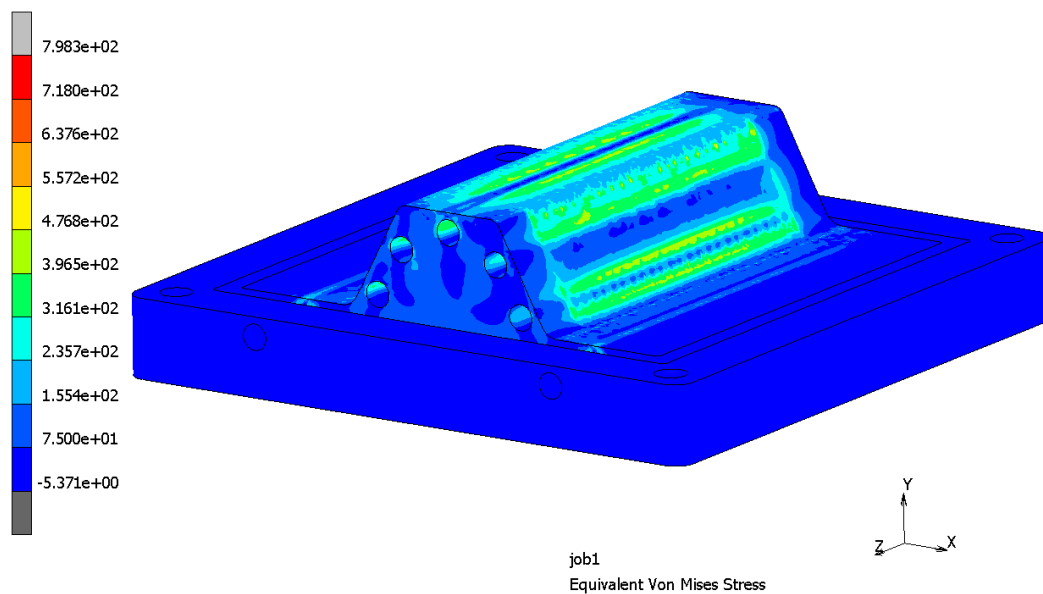


Figura 3.41: Tensiones de *Von Mises* zona derecha sin visualización de mallado cuadrático

Se observa que los valores de tensiones obtenidas son mucho mayores que en el caso anterior, casi duplicándolas, llegando a los 798,3 MPa. Esto puede deberse a que en el caso anterior, al haber elementos mayores y menor cantidad de nodos, no quedaban recogidos los puntos suficientes para que quedasen recogidas todas las tensiones que podían aparecer.

Además, se sabe que a menor tamaño de elemento de malla, más imprecisas son las simulaciones y más difieren los resultados respecto de la realidad, por lo que se considera que los valores obtenidos en este caso son más cercanos a un sistema real que en el caso anterior.

Mallado lineal manual (TET4)

Finalmente, se realiza un tercer mallado. Se trata de un mallado lineal manual optimizado, para ello se procede a la asignación de semillas¹ por partes como puede verse en la Figura 3.42. De esta manera se puede obtener un mallado muy fino en las zonas de interés, como son los espesores pequeños y las zonas con radios de acuerdo, y un mallado más grueso en las zonas inferiores del molde que no van a sufrir durante el proceso.

¹Las semillas, también denominadas *seeds*, sirven para elegir la densidad de malla deseada en cada cara o arista de la pieza de estudio, estipulando la distancia entre las mismas, que dirá el tamaño de los elementos, o según número de semillas deseado.

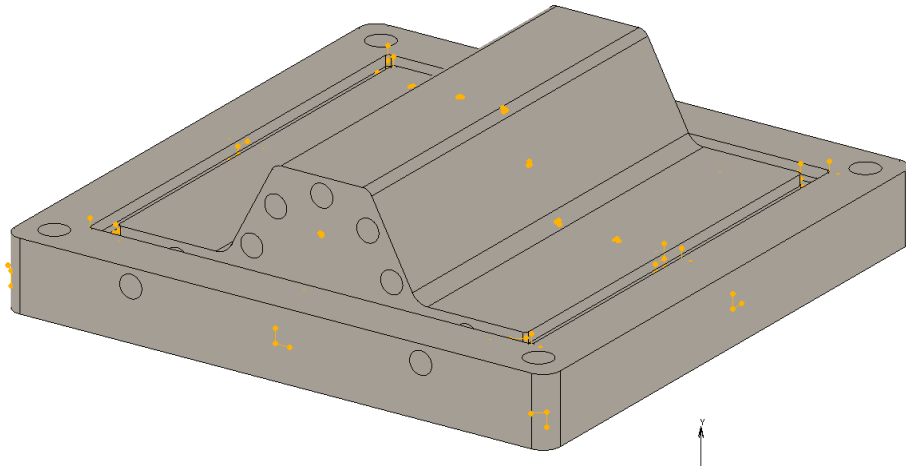


Figura 3.42: Semillas para el mallado

De esta forma, se obtiene un análisis mucho más preciso en las zonas de interés al haber una densidad de elementos mucho mayor, pero sin incrementar en exceso su número ya que en las zonas de menor interés los elementos son más grandes.

Se realizan unos elementos de los siguientes tamaños:

- 4 mm en todas las caras de bajo interés, es decir en las inferiores del molde y en las más externas.
- 1 mm en los vértices más superiores y en las caras que van a entrar en contacto con la fuerza ejercida.
- 0,25 mm en las caras interiores de los orificios, que son los más cercanos a las zonas críticas de espesor bajo y que se ha comprobado anteriormente que son las que se encuentran sometidas a una mayor tensión.

Se obtiene el siguiente resultado:

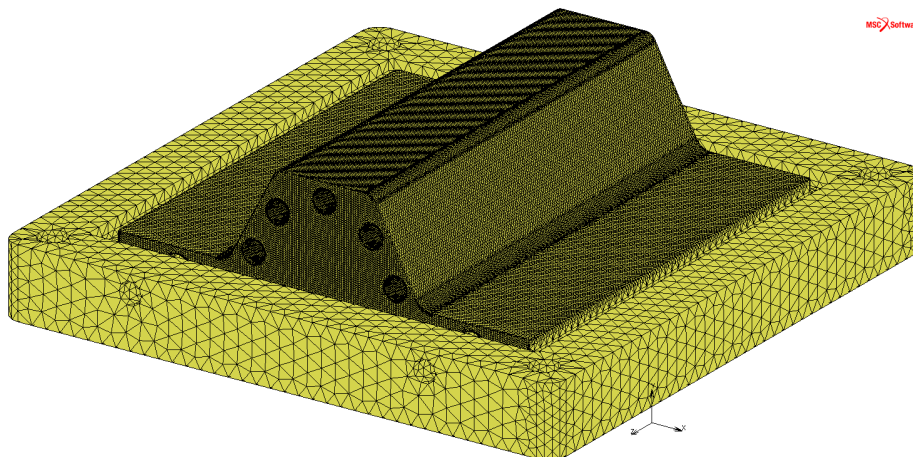


Figura 3.43: Mallado final del molde en 3 dimensiones

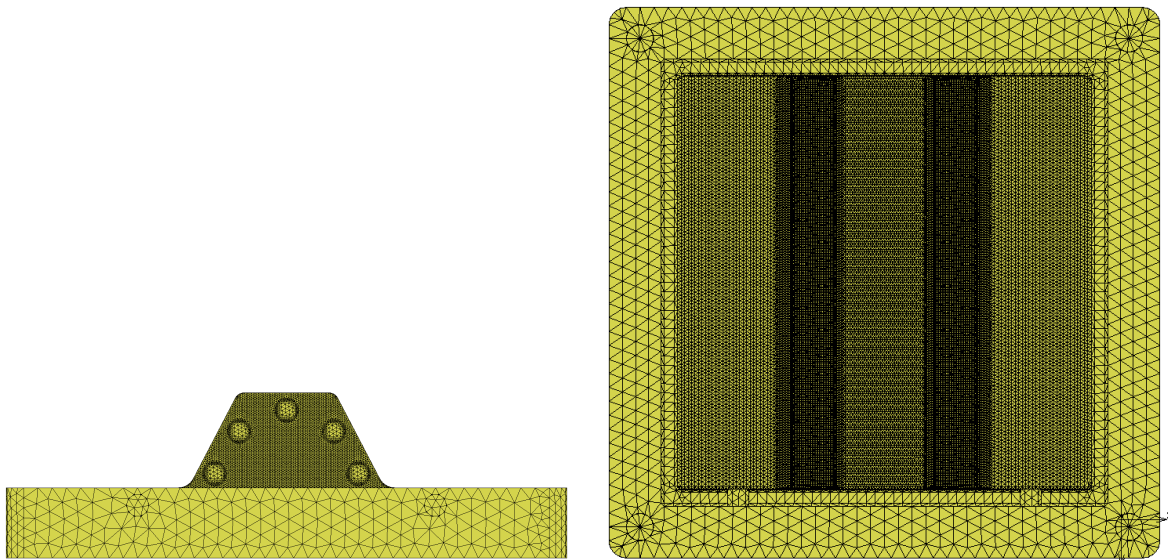


Figura 3.44: Malla final frontal

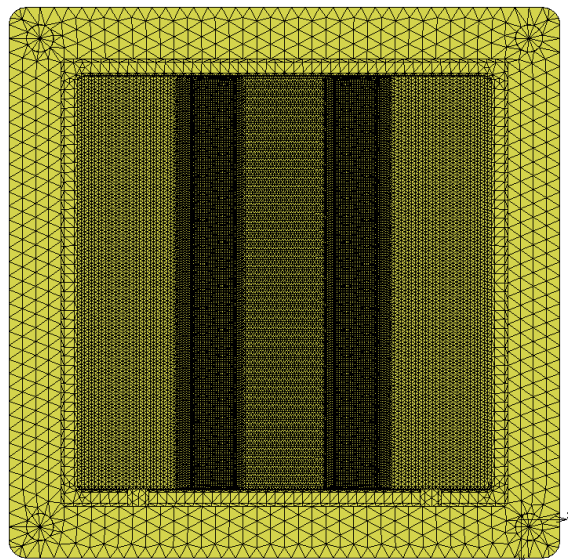


Figura 3.45: Malla final superior

Se puede apreciar perfectamente la superioridad numérica de elementos en las zonas de interés respecto de las zonas muy alejadas a las tensiones máximas.

En este caso, se obtiene un mallado con 265755 nodos y 1270494 elementos. Si comparamos estos valores con los 544664 nodos y 363953 elementos obtenido en el caso de la malla cuadrática, se puede observar que se ha incrementado mucho el número de elementos presentes, esto se debe a que, a pesar de tener elementos grandes en la zona inferior, se trata de un mallado muy fino en la zona crítica, lo que le proporciona mucha más exactitud al ensayo. Por otro lado, el número de nodos ha bajado considerable-

mente, esto se debe a que al no haber un nodo en el centro de cada arista, disminuyen mucho en número.

Para este análisis, el resto de parámetros permanecen igual que con los mallados anteriores y se obtienen las siguientes tensiones de *Von Mises*:

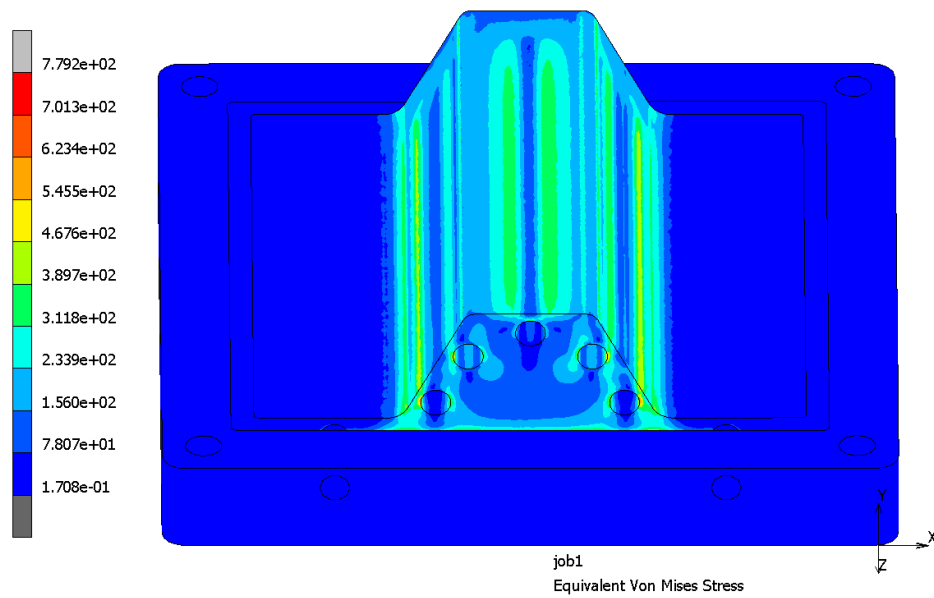


Figura 3.46: Tensiones de *Von Mises* con mallado final

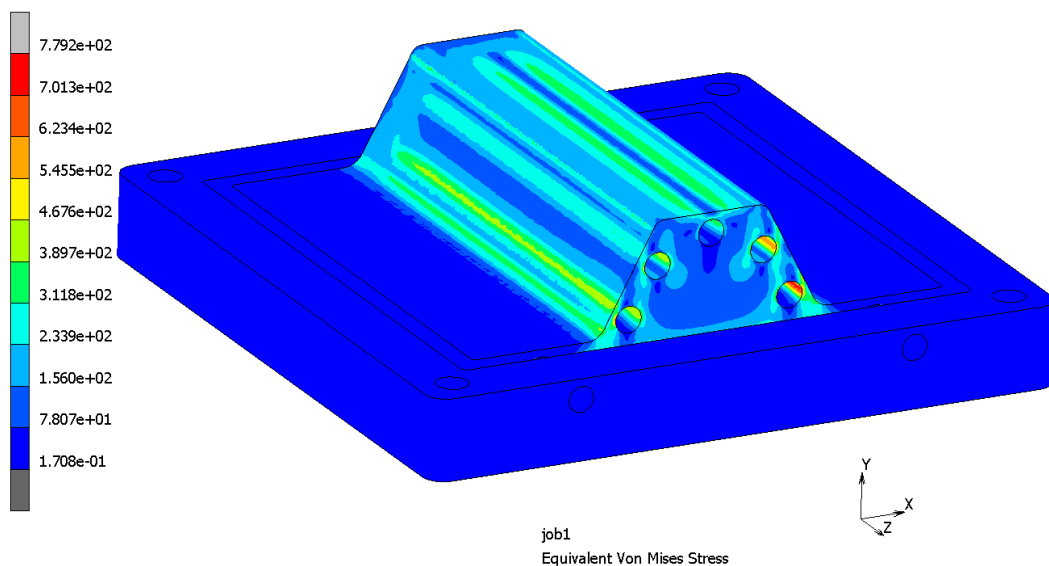


Figura 3.47: Tensiones de *Von Mises* zona izquierda

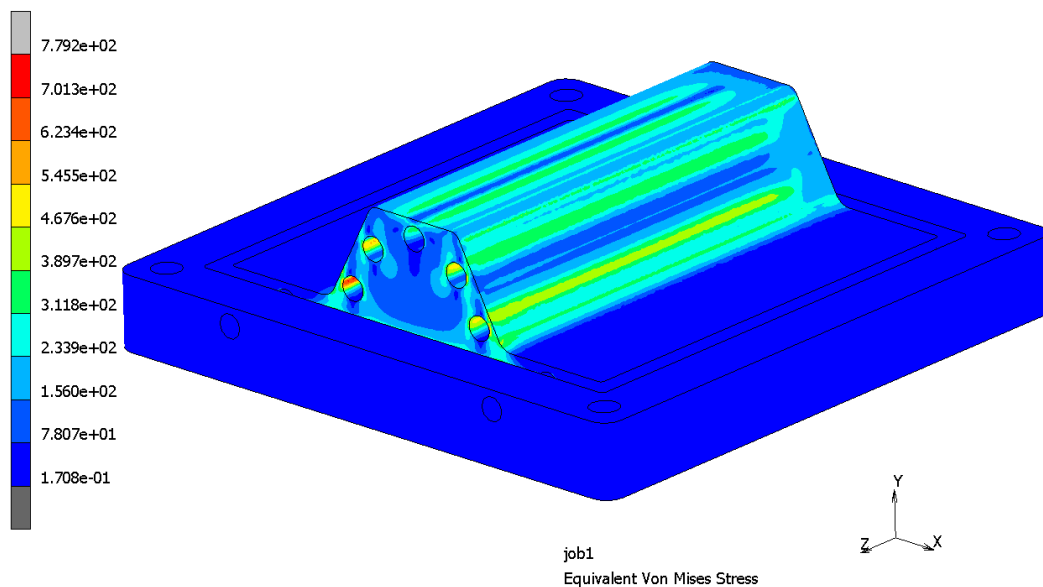


Figura 3.48: Tensiones de *Von Mises* zona derecha

Se puede observar que, en este caso, las curvas de tensiones siguen una distribución más continua y lineal, lo que hace que se aproxime más al comportamiento real de un material isótropo como es el de estudio.

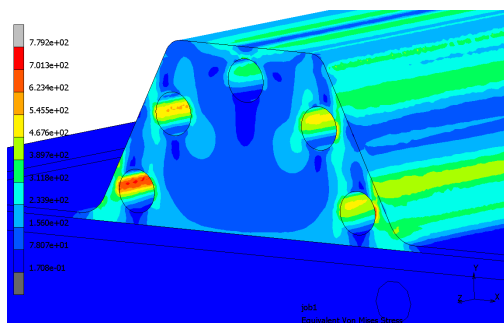


Figura 3.49: Tensiones de *Von Mises* zona de orificios

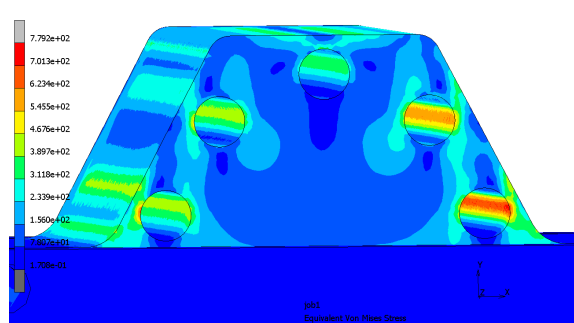


Figura 3.50: Tensiones de *Von Mises* zona de orificios

Se puede ver en las Figuras 3.49 y 3.50 que las tensiones no son totalmente simétricas, pudiéndose observar unas mayores tensiones en la zona izquierda respecto de las de la derecha. Esto puede deberse, al igual que en el caso anterior, a que el mallado no es totalmente simétrico y se pueden dar ciertas desviaciones.

Además, se observa que en este caso, los valores de tensión máxima son similares a

las del caso anterior, tomando un valor máximo de 779,2 MPa. Teniendo en cuenta que el caso del mallado cuadrático era más preciso que el inicial por el incremento en el número de elementos y nodos y que este es el más preciso de los tres, se pueden considerar unos valores aceptables respecto a lo que sucedería realmente.

Con todo esto, se puede concluir con que este mallado manual se trata del mejor de los tres casos ya que cuenta con la precisión necesaria para realizar el ensayo correctamente y, además, tiene un número de nodos bastante menor y unos elementos con formas más regulares.

De esta forma se tiene un modelo con un coste computacional mucho menor que en el caso del mallado cuadrático automático y da como resultado unas distribuciones tensionales más continuas, acercándose así más a la realidad por su regularidad en el mallado.

Tras la realización de todos estos ensayos al molde, se considera que para conseguir un mejor resultado, sería conveniente desplazar los orificios presentes para refrigeración y las resistencias hacia la zona central del molde, de manera que los espesores que ahora son pequeños aumenten, evitando así zonas de concentración de tensiones grandes.

En todos los casos se ha considerado que la simulación se efectúa de manera isoterma para simplificar los ensayos.

3.3.3. Ensayos de la pieza conformada

Por último, se quiere comprobar la diferencia de comportamiento entre una pieza, con la forma que proporcionaría el molde, fabricada de aluminio frente a la misma pieza en un material compuesto con fibra de vidrio larga.

Ensayo de la pieza en aluminio. Primer mallado. (QUAD4)

Para este ensayo, en primer lugar se importa a *Marc Mentat* la pieza con la forma deseada como se puede ver en la Figura 3.51

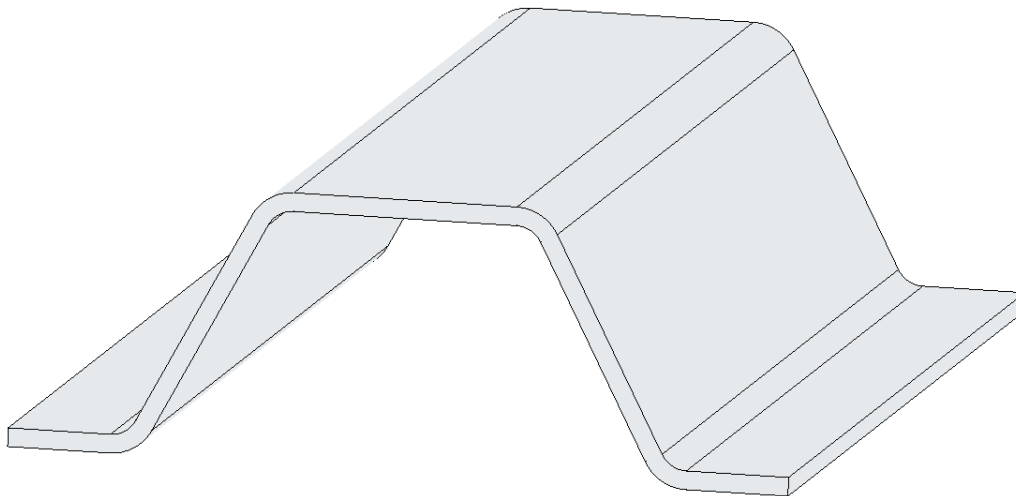


Figura 3.51: Pieza en forma de omega

La manera de proceder en esta ocasión varía respecto de los casos anteriores. En primer lugar, se toma únicamente una de las superficies de la pieza, en este caso, la superior.

Para crear la malla, se procede dividiendo todas las aristas presentes. Los tamaños de estas divisiones varían en función del nivel de precisión que se requiera en cada zona, de esta manera, y observando los resultados de las tensiones obtenidas en el apartado 4.3.1 de este mismo documento, se considera que las zonas de radios de acuerdo van a ser los que van a necesitar elementos más pequeños para que queden definidos lo máximo posible y de la manera más fiel a la realidad posible.

Además, se trata de hacer una progresión en el tamaño de los elementos, desde el tamaño más pequeño que se encuentra en los radios de acuerdo hasta el más grande, presente en las zonas lineales.

De esta manera, se tienen unas divisiones de 2 mm en las zonas alejadas de los puntos que se creen más críticos y de 0,5 mm en las zonas de radios de acuerdo.

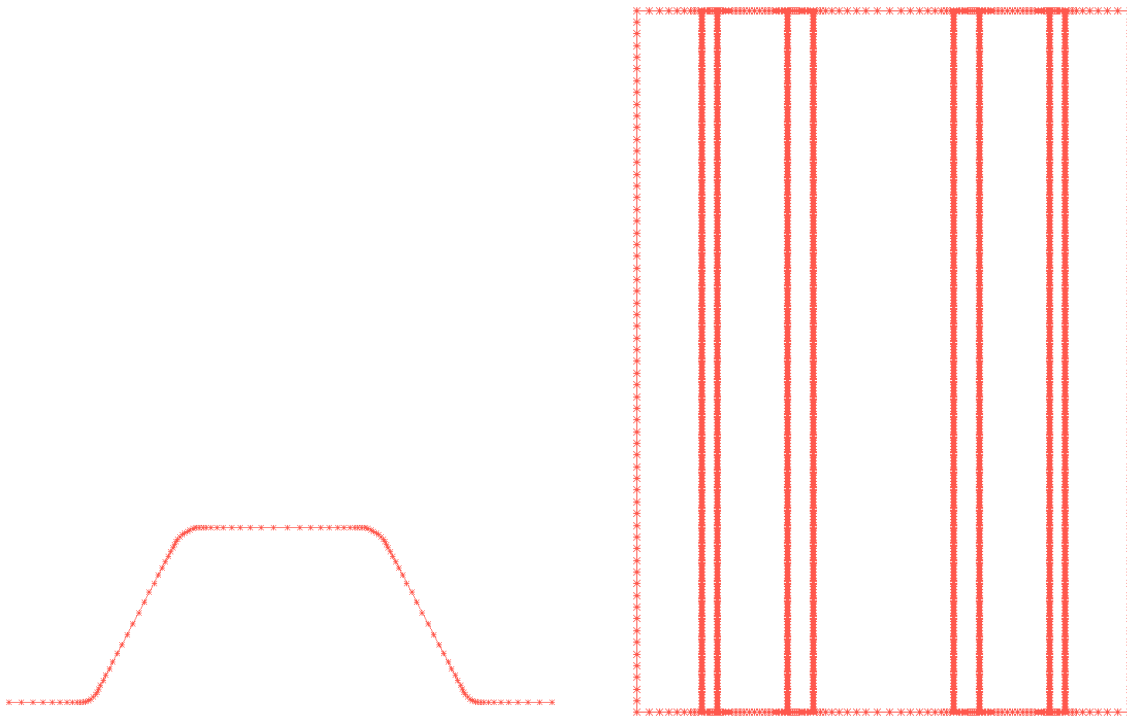


Figura 3.52: Divisiones de la superficie. Vista frontal

Figura 3.53: Divisiones de la superficie. Vista superior

A partir de esto, se realiza un mallado automático. El programa lo realiza de manera que en los extremos de la pieza los elementos coincidan con las divisiones realizadas anteriormente mientras que en las zonas centrales de la pieza, provee de un relleno más aleatorio en base a su propio criterio.

De esta forma se obtiene el siguiente mallado:

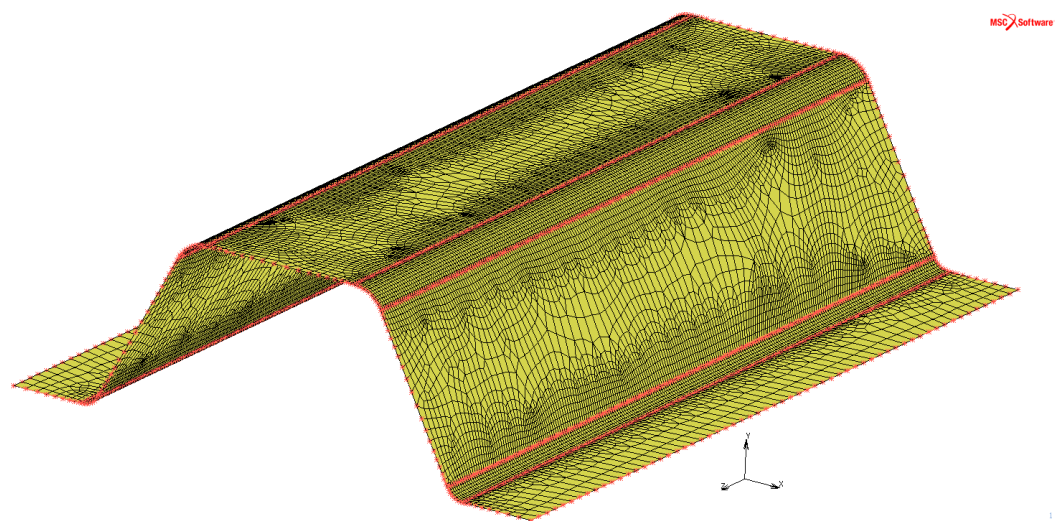


Figura 3.54: Mallado inicial de la pieza

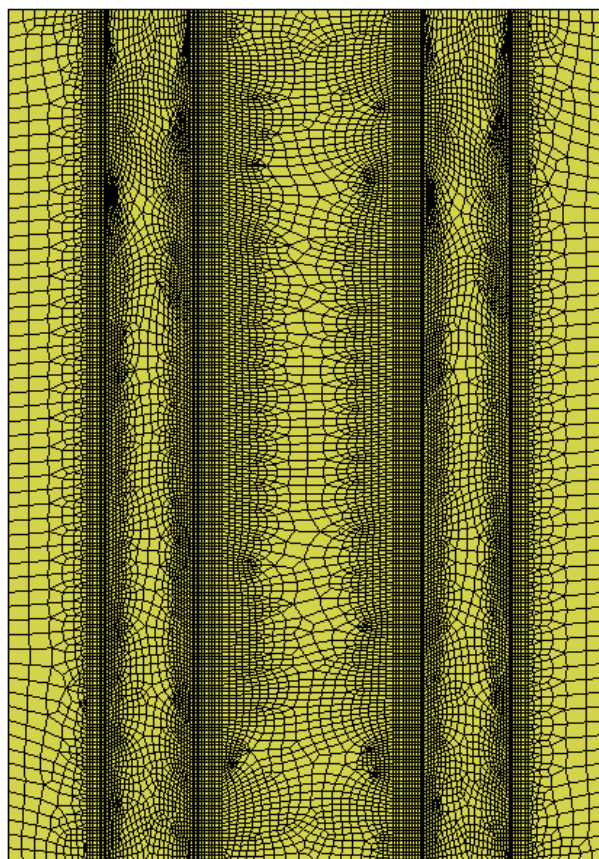


Figura 3.55: Mallado inicial de la pieza. Vista superior

Se puede observar que la malla obtenida no es demasiado uniforme, habiendo cambios considerables en las formas de los elementos.

Si se observa la Figura 3.56, se puede apreciar que en las zonas más próximas a las divisiones hechas previamente en los bordes, los elementos tienen una forma relativamente uniforme rectangular, mientras que cuanto más se aleja de los mismos, los elementos toman formas romboidales muy diversas.

De esta forma, se puede intuir incluso antes de realizar el análisis, que las tensiones que se obtengan no van a ser del todo precisas.

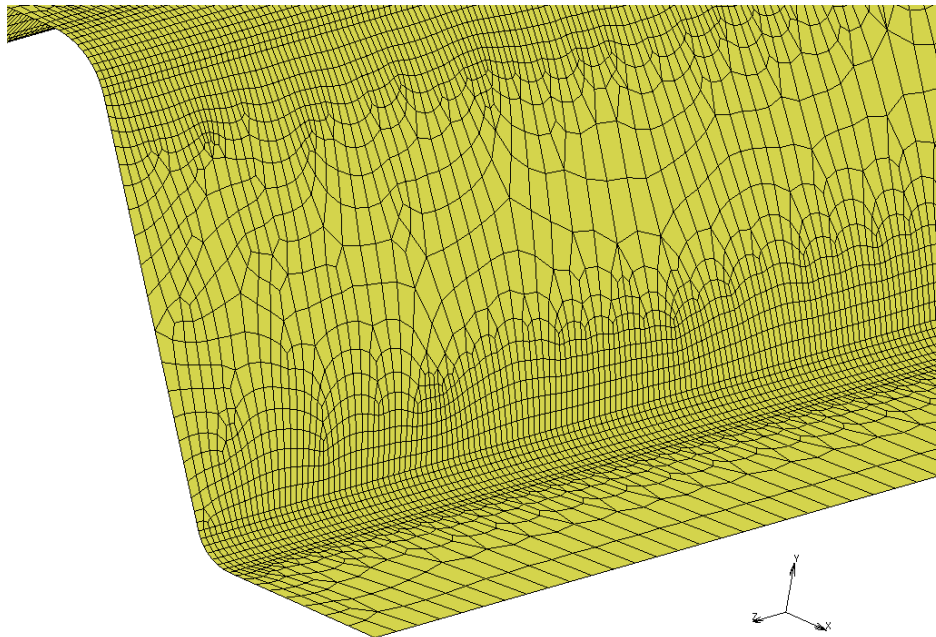


Figura 3.56: Detalle del mallado inicial de la pieza

En este caso, se obtiene un mallado con elementos lineales QUAD4, compuesto por elementos cuadrados planos con 4 nodos. Éste, cuenta con 21793 elementos QUAD4 y 21965 nodos.

A continuación, se procede a asignarle a la superficie espesor, en este caso se tiene una lámina de 2 milímetros por lo que se le asigna dicho valor al espesor y se le proporciona un *offset* de un milímetro para que la superficie que se ha mallado se encuentre en la zona superior del espesor ya que sin él, el programa consideraría que la superficie mallada se encuentra en el plano medio del espesor. Esto se puede observar en las Figuras 3.57 3.58.

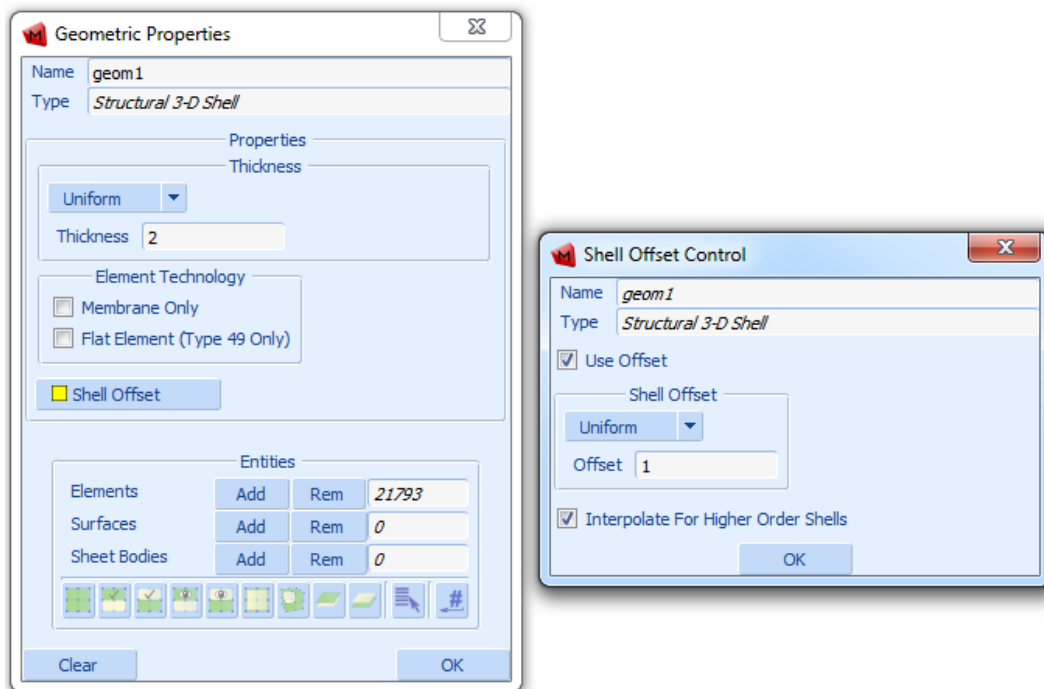


Figura 3.57: Valores para la geometría mallada de la pieza

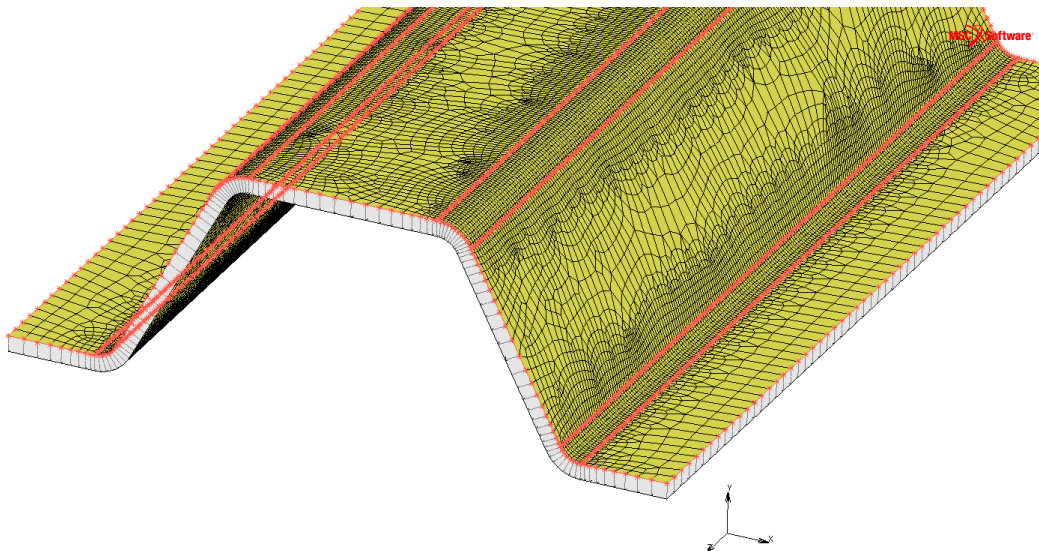


Figura 3.58: Detalle de la geometría mallada de la pieza

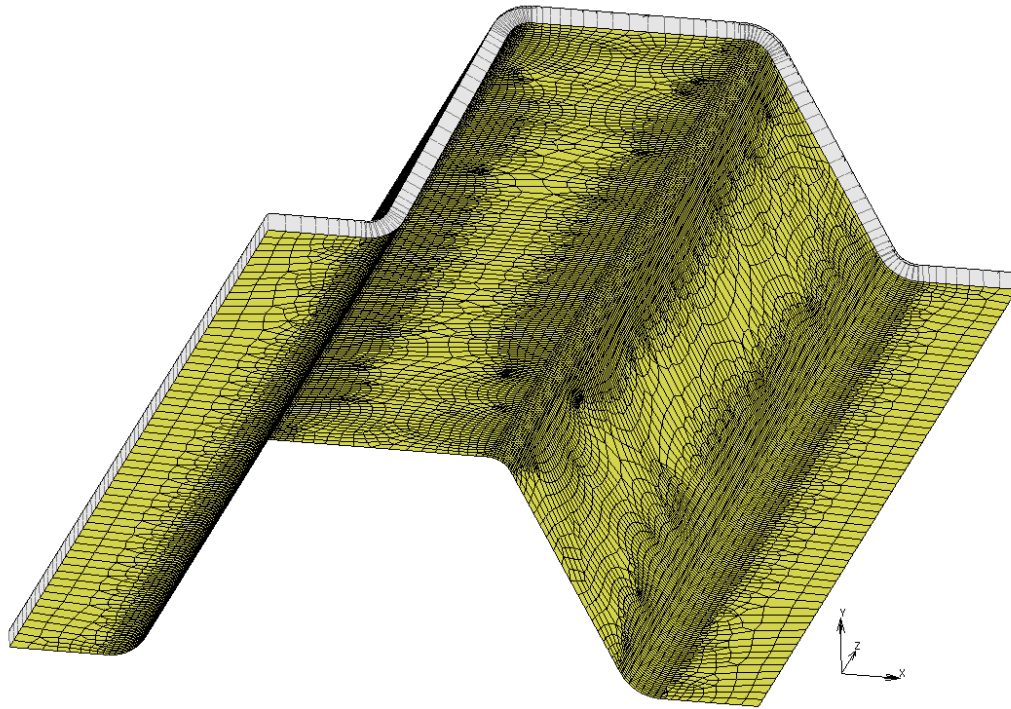


Figura 3.59: Mallado inferior de la pieza

Los elementos obtenidos en este tipo de mallado toman el nombre de *shell*².

Como se puede observar, el mallado toma como base los puntos rojos que se pueden apreciar en la Figura 3.58, que corresponden con las divisiones realizadas previamente que se sitúan en la cara superior de la pieza y se extiende por todo el espesor impuesto para la superficie, de manera que la zona inferior cuenta con los mismos elementos que la superficie inicial, ya que se tratan de los mismos elementos pero con el espesor asignado.

Posteriormente, se procede a crear el material de la pieza, en este caso aluminio con módulo de *Young* de 70000 MPa y módulo de *Poisson* de 0.3 y se le asigna a todos los elementos presentes en la simulación.

²Un elemento shell es un elemento plano en el que se calculan, en cada punto, los valores demandados en su mismo plano y en cuatro nodos más tomados perpendicularmente al plano medio y repartidos uniformemente por el espesor que se le asigne en cada caso.

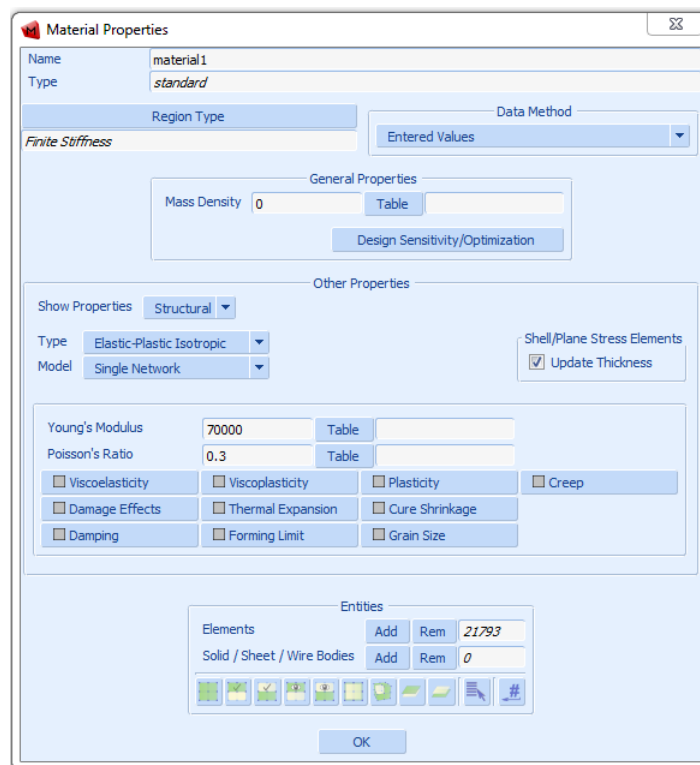


Figura 3.60: Material asignado a la pieza

Al igual que en los ensayos anteriores, para poder realizar un análisis, es necesario asignar condiciones de contorno al sistema.

En este caso, en el apoyo, es necesario estipular que no haya desplazamientos en ninguno de los tres ejes y, además, al considerarse como apoyo una única línea, será necesario establecer también giros nulos como se puede ver en las Figuras 3.61 y 3.63.

Además, se considera una fuerza de 100 N en la dirección positiva del eje Y actuando sobre el extremo opuesto de la pieza. Esta carga considerada habrá que dividirla entre el número de nodos afectados para obtener la fuerza unitaria que va a soportar a efectos prácticos durante la simulación cada nodo. De este modo, se obtienen los valores que se pueden observar en las Figuras 3.62 y 3.64.

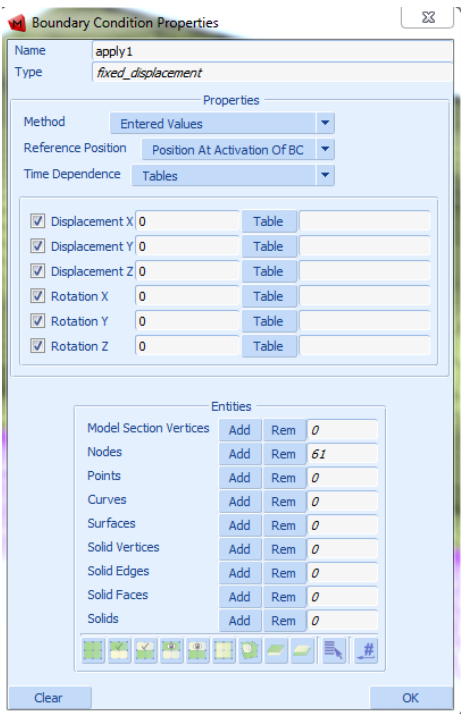


Figura 3.61: Valores de apoyo de la pieza

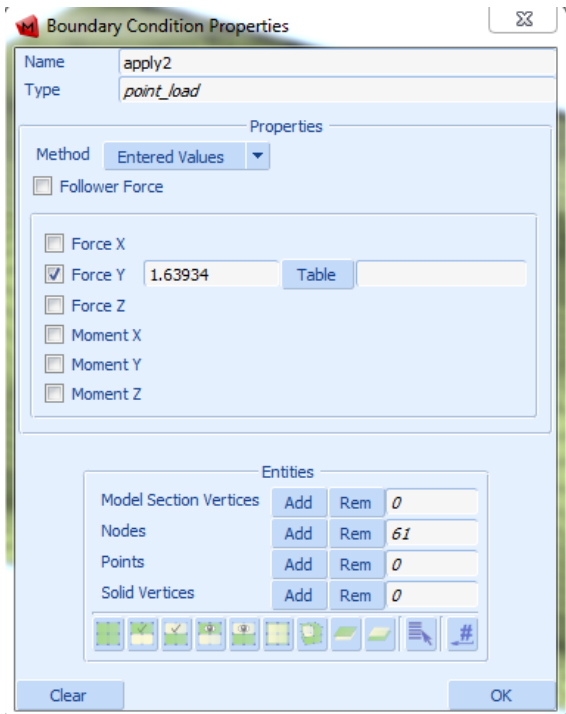


Figura 3.62: Valores de carga sobre la pieza

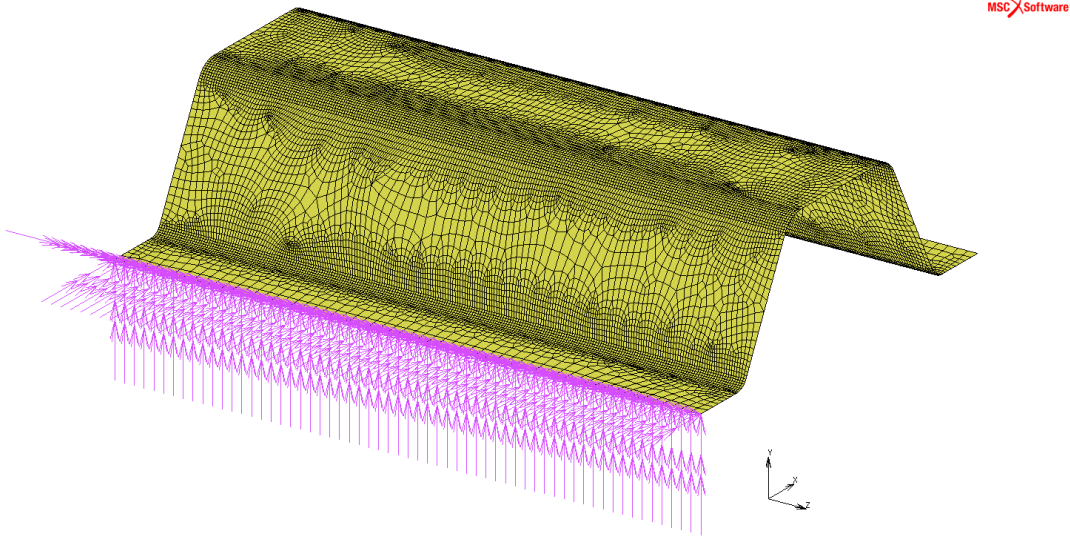


Figura 3.63: Apoyo de la pieza

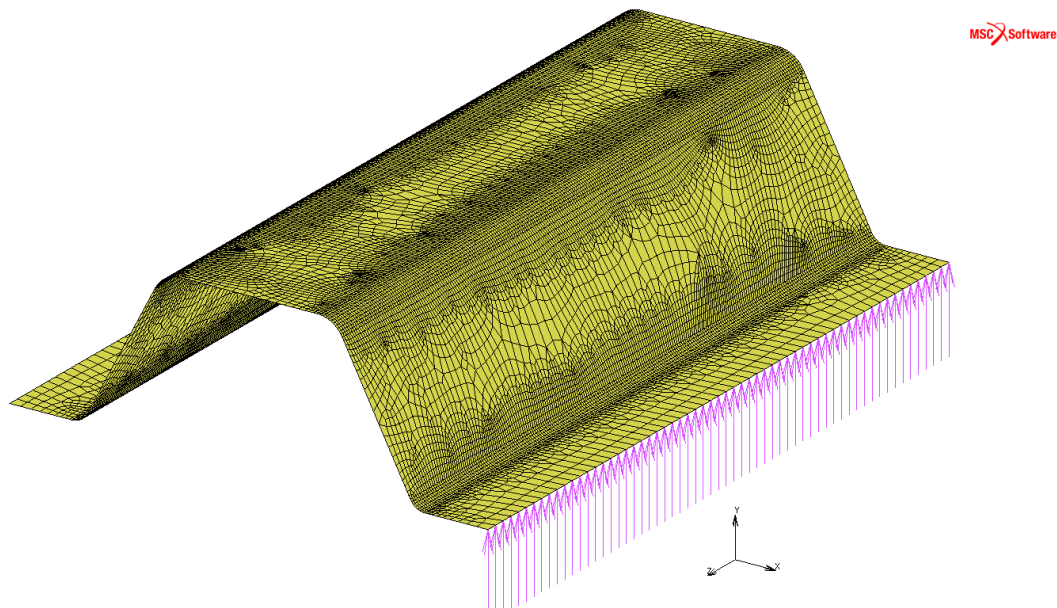
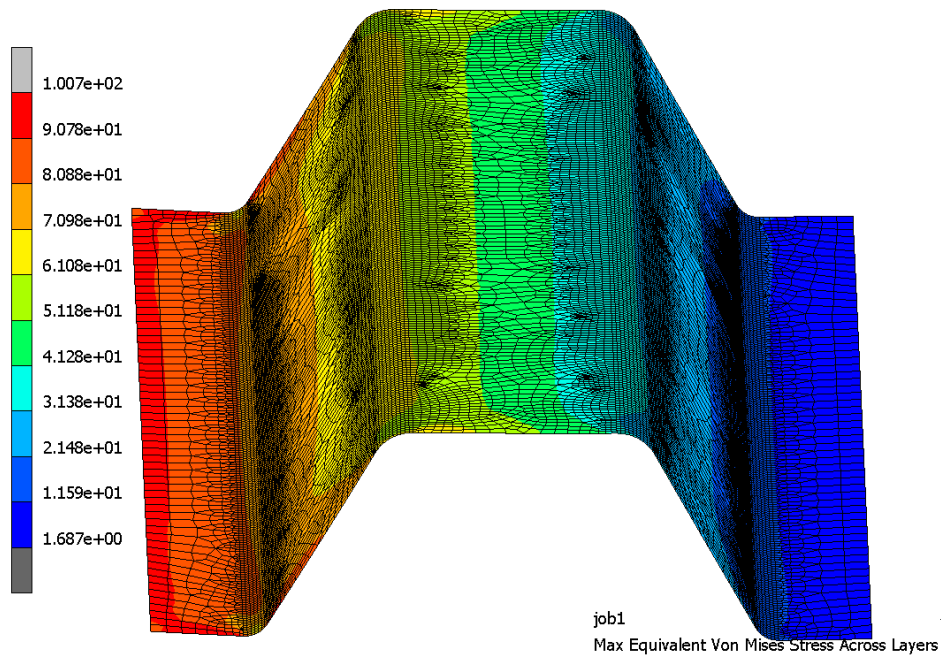
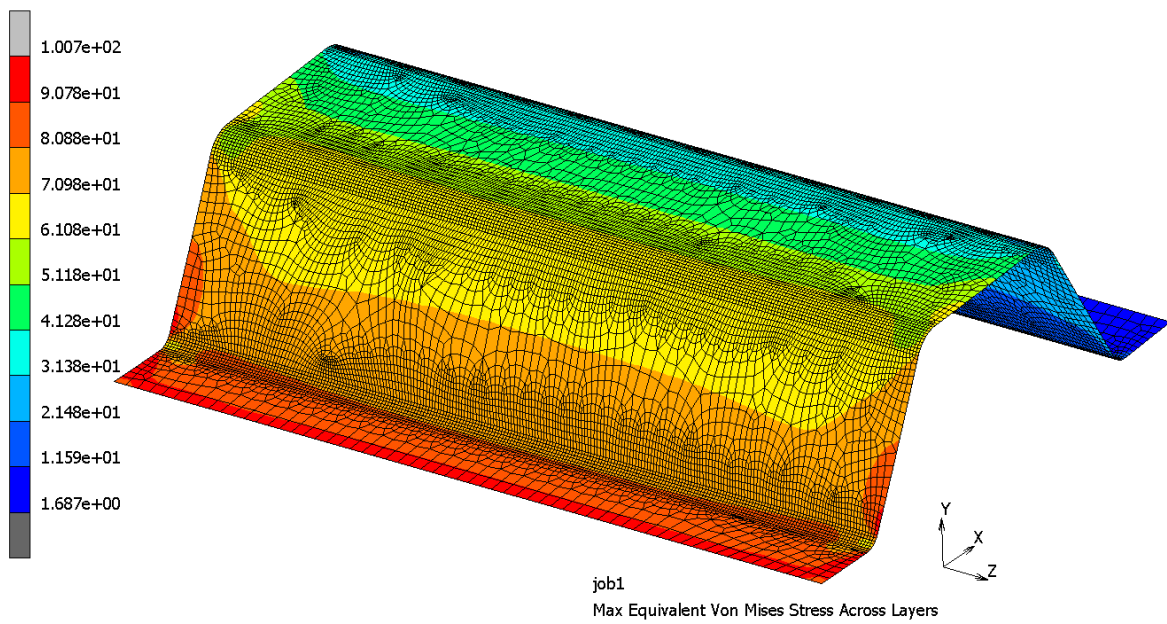


Figura 3.64: Carga sobre la pieza

En este caso, se fija un único paso de cálculo ya que va a haber deformaciones relativamente pequeñas.

Además, en este análisis, se buscan las tensiones de *Von Mises* máximas y mínimas, de modo que se obtienen para cada elemento, el punto más crítico. Se realiza de esta manera en lugar de como se ha realizado en los casos anteriores, con la tensión equivalente, debido a que en esta ocasión, al utilizar elementos tipo *shell*, el cálculo se realiza en 5 puntos del espesor de cada elemento y el valor máximo, que suele ser el de interés en las simulaciones, no tiene obligación de estar en el plano medio, que es el valor que aparecería si se tomasen la tensión equivalente en lugar de las máximas. De este modo, se obtienen las tensiones máximas de cada elemento independientemente de en cual de las cinco capas de estudio se encuentre.

Con todo esto, se realiza un ensayo y se obtienen las siguientes tensiones de *Von Mises* máximas:

Figura 3.65: Tensiones de *Von Mises* máximas con mallado 1Figura 3.66: Tensiones de *Von Mises* máximas en el lado de apoyo

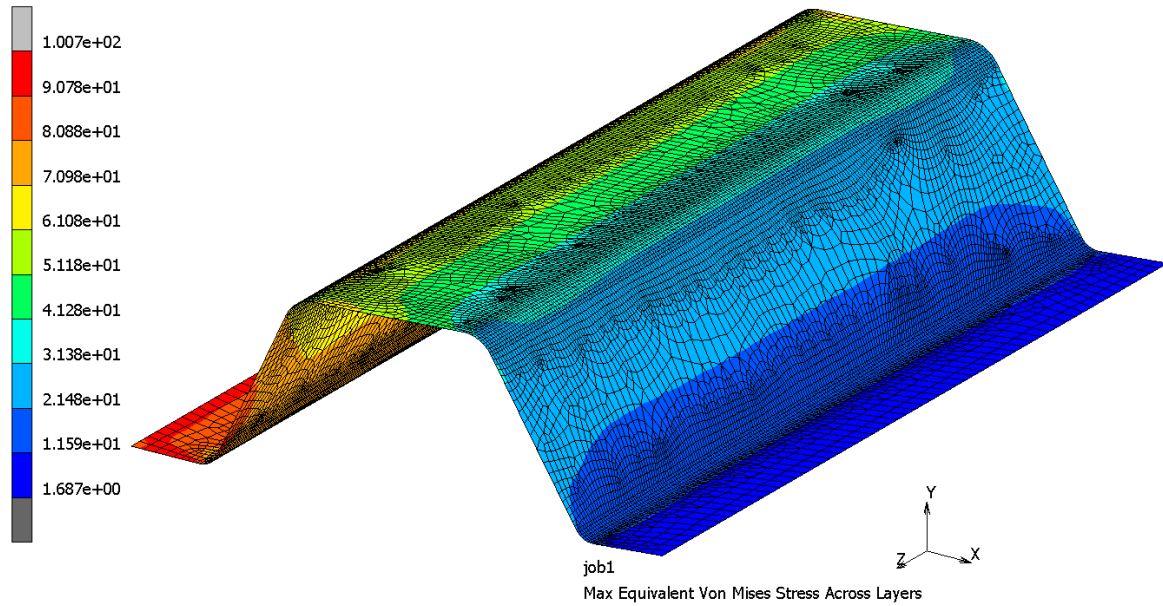


Figura 3.67: Tensiones de *Von Mises* máximas en el lado de la fuerza

Se puede observar que la zona que más tensiones soporta es la más próxima a los apoyos, ya que es en la zona en la que hay una restricción y, por tanto, no va a poder desplazarse o deformarse libremente por lo que se generan dichas tensiones. En estos puntos, la tensión máxima es de 100,7 MPa

Además, la tensión máxima, marcada en rojo en las Figuras anteriores, se prolonga más por las zonas más extremas de la pieza que por la zona central. Esto se debe a que las zonas extremas de las piezas son las que tienden a sufrir más por los efectos de borde.

Con los datos obtenidos, se calcula el coeficiente de seguridad con la relación entre el límite de elasticidad y la tensión equivalente de *Von Mises* máxima obtenida y se obtiene lo siguiente:

$$c.s_{Al} = \sigma_y / \sigma_{EcVMmax} = 250 / 100,7 = 2,483 \quad (3.6)$$

Del mismo modo, se obtienen los siguientes desplazamientos:

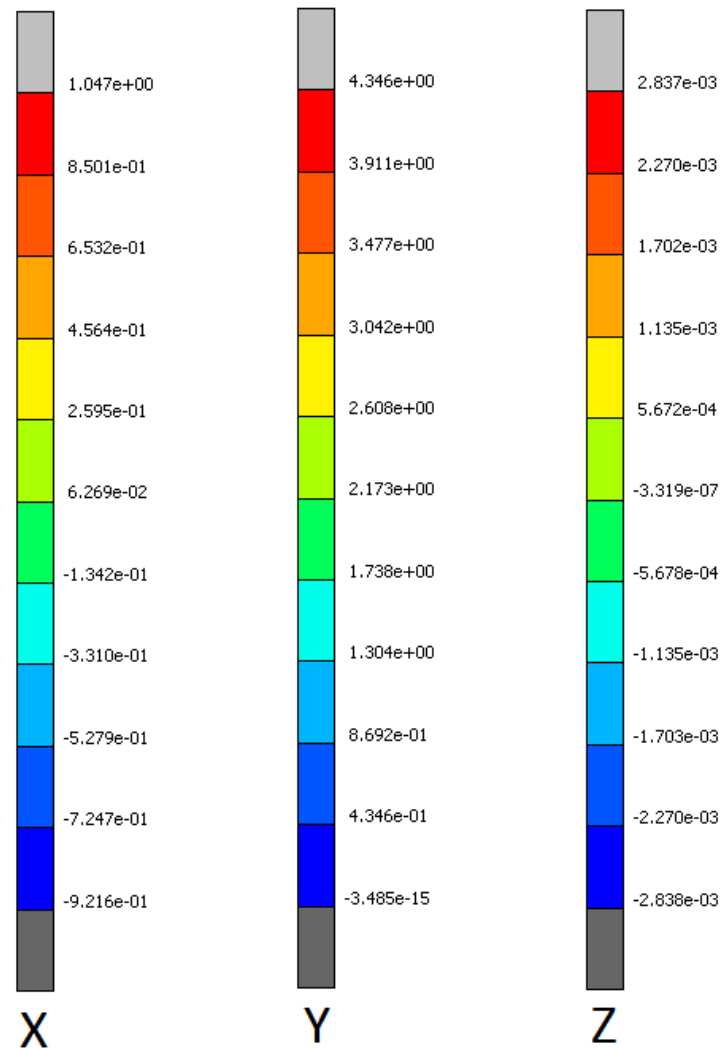


Figura 3.68: Valores de desplazamientos en los ejes X, Y, Z

Se comprueba que los máximos desplazamientos se dan, como es lógico, en el eje Y, ya que es en este plano en el que se da la fuerza actuante. De este modo, se tiene un desplazamiento máximo en este eje de aproximadamente 4 mm.

El segundo eje que más desplazamientos experimenta es el eje X, esto es debido a que al darse la flexión en el plano XY, y al estar en uno de los extremos de la pieza fijo, el desplazamiento vertical generado por la fuerza vertical ejercida provocará un giro respecto al eje Z coincidente con la arista en la que se encuentra el apoyo; de esta manera, a cada desplazamiento vertical le corresponde un cierto desplazamiento horizontal debido al giro. En este caso, se dan unos desplazamientos máximos de aproximadamente 0,85 mm

Por otro lado, el eje en el que menores desplazamientos aparecen es en el Z, que es el eje que se encuentra perpendicular al plano XY, este se puede considerar despreciable frente a los otros dos.

En la Figura 3.69 se pueden observar, de manera ampliada, los movimientos resultantes en el plano XY.

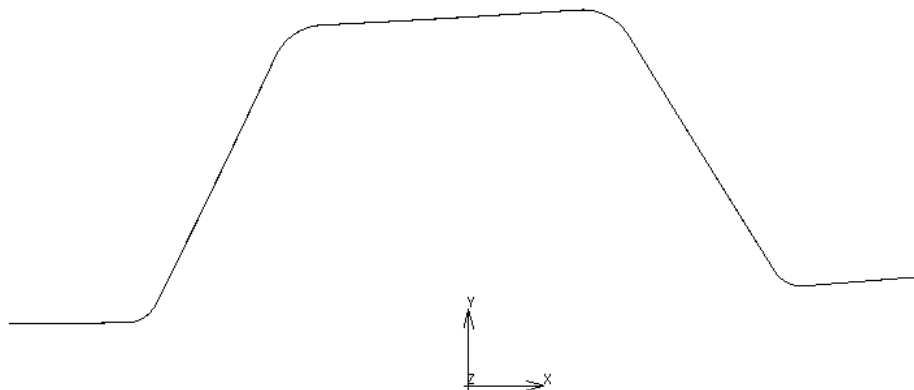


Figura 3.69: Desplazamientos en el plano XY

Ensayo de la pieza en aluminio. Segundo mallado. (QUAD4)

A pesar de que los valores obtenidos anteriormente son aparentemente buenos, al tratarse de un mallado muy irregular, se quiere comprobar que estos valores se mantienen si se utiliza una malla más regular y simétrica, de manera que los elementos tengan formas similares todos ellos variando únicamente en su tamaño.

Por esto se procede a realizar un segundo mallado de la pieza. En esta ocasión, se divide únicamente una sección de la superficie superior de la pieza como se puede observar en la Figura 3.70 representado por cruces rojas.

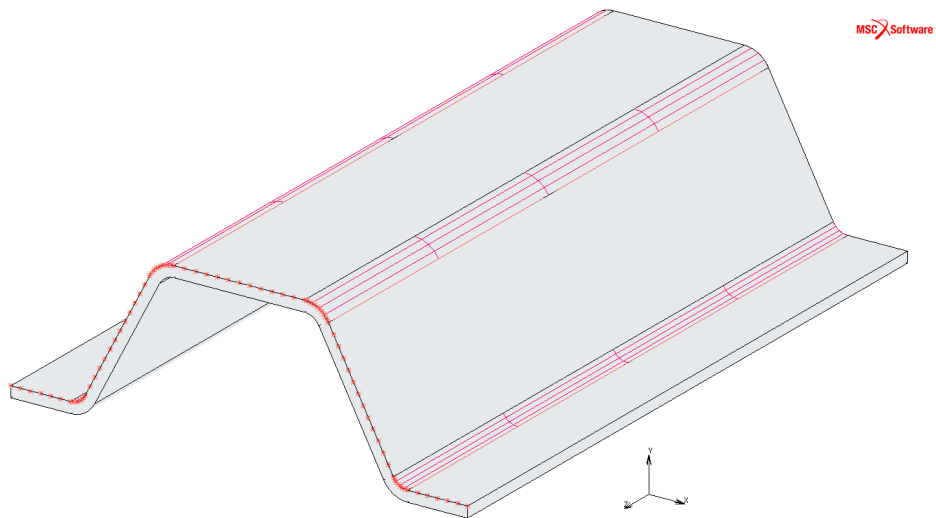


Figura 3.70: División de una sección de la cara superior para el mallado

Se realiza el mallado a partir de dichas divisiones y se expande en toda su extensión de acuerdo a los datos estipulados, que son: 60 elementos de 2 mm cada uno, lo que en conjunto llega a cubrir los 120 mm de extensión con la que cuenta la pieza, además, se le da un espesor a los elementos de 2 mm y se obtiene una malla como la que se observa en las Figuras 3.71 y 3.72.

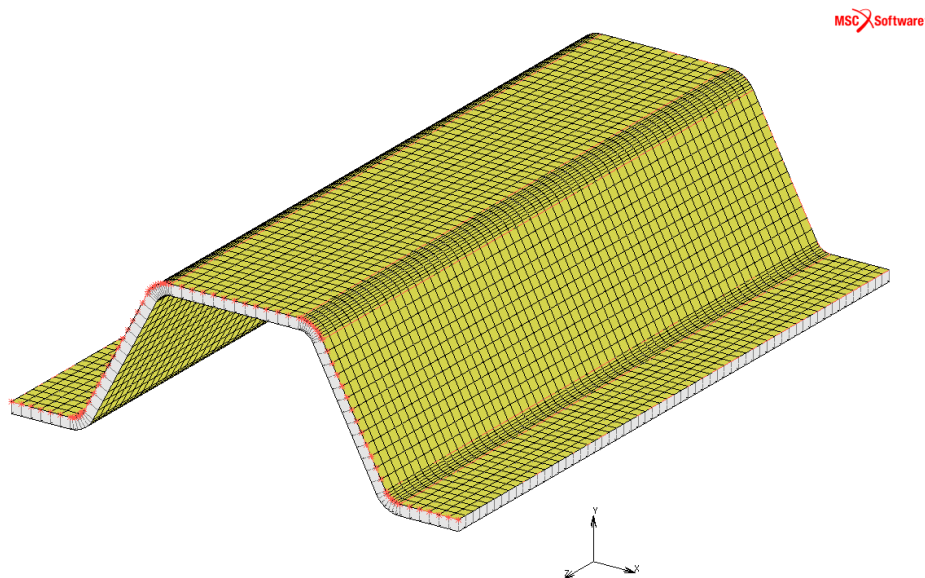


Figura 3.71: Mallado uniforme de la pieza

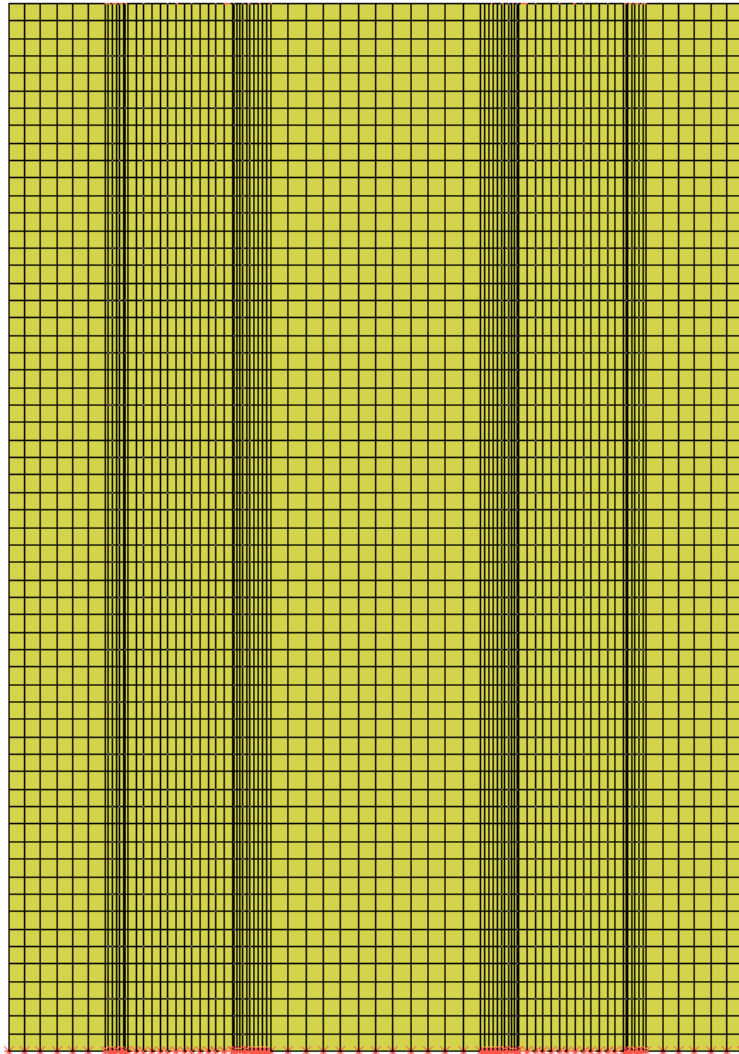


Figura 3.72: Mallado uniforme de la pieza. Vista superior

Al igual que en el caso anterior, se trata de un mallado con elementos lineales QUAD4 de forma plana cuadrada y con 4 nodos cada uno. De este modo se obtienen 5160 elementos de tipo QUAD4 y 5307 nodos. Se puede observar que este modelo cuenta con un número de elementos y nodos significativamente menor que el caso anterior.

El resto de parámetros de la simulación quedan invariantes respecto del caso anterior, a excepción de la carga y el apoyo. Esto se debe a que al haber modificado la malla, no va a haber el mismo número de nodos sobre los que se aplican.

Los valores en el caso del apoyo se mantienen, es decir, se toman desplazamientos y giros con valor 0 en todos los casos.

Sin embargo, la carga se puede ver modificada en función del número de nodos sobre los que se aplica la fuerza. En este caso, al haber 61 nodos presentes en la arista en la que se aplica la carga, la fuerza resultante en cada nodo es de $100/n = 100/61 = 1,639\text{ N}$.

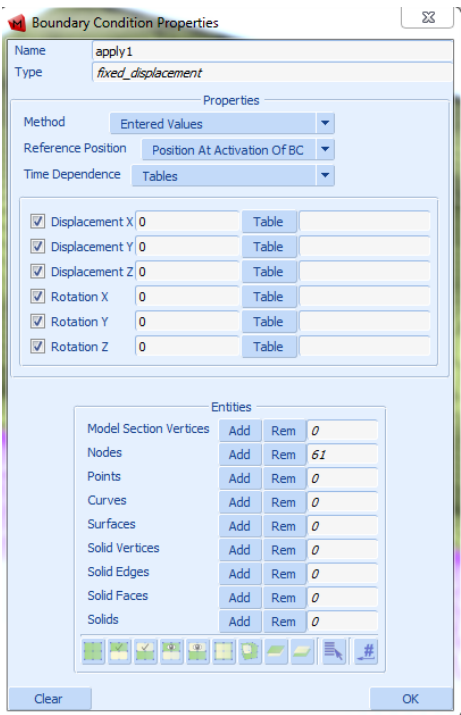


Figura 3.73: Valores de apoyo de la pieza con mallado uniforme

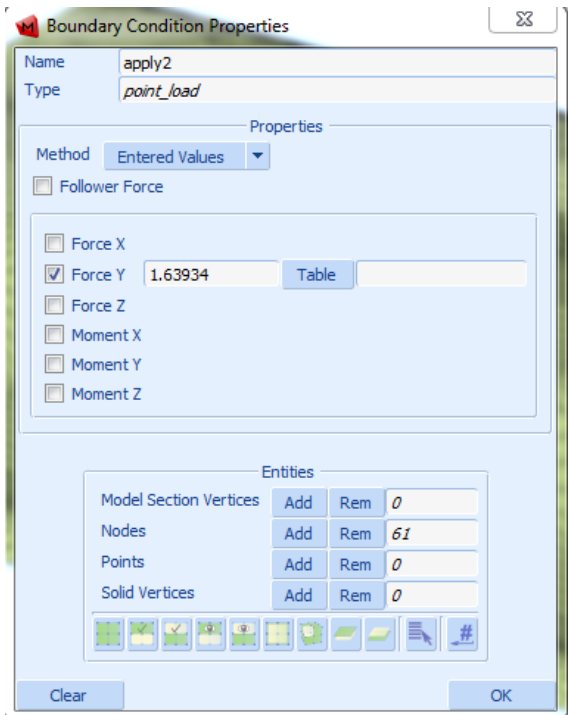


Figura 3.74: Valores de carga sobre la pieza con mallado uniforme

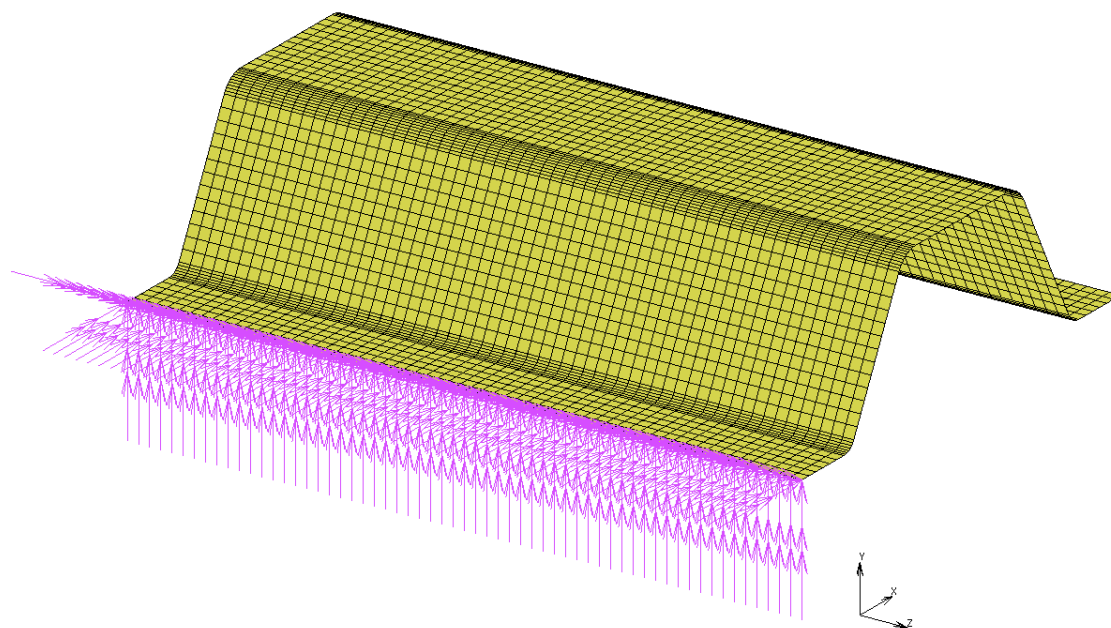


Figura 3.75: Apoyo de la pieza con mallado uniforme

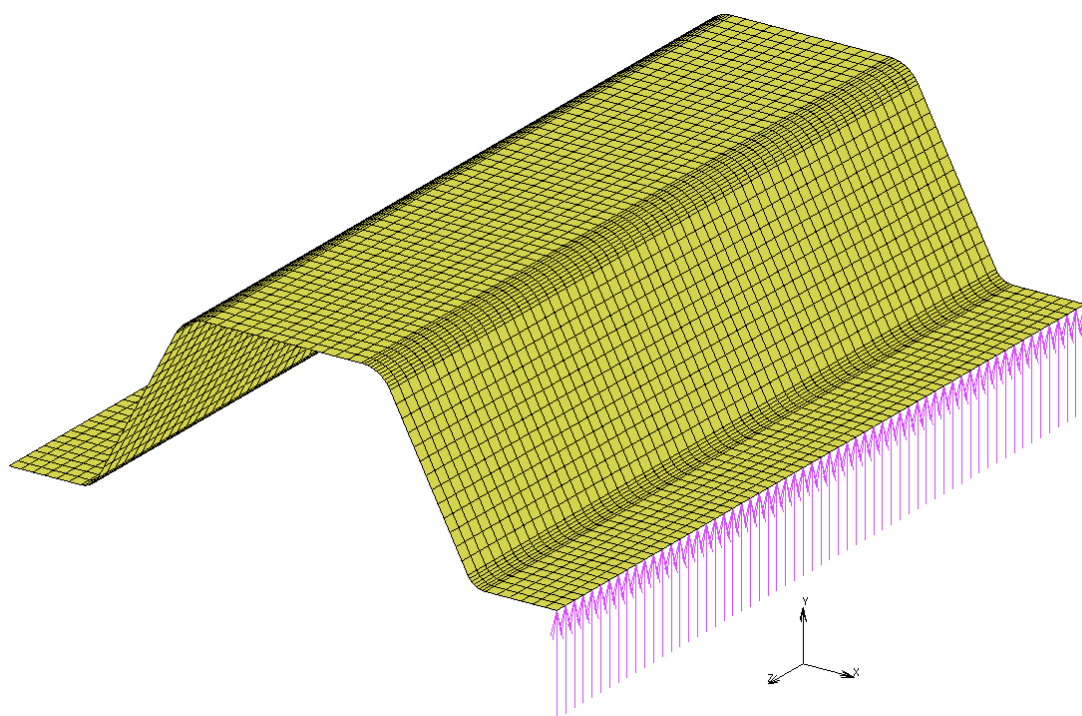


Figura 3.76: Carga sobre la pieza con mallado uniforme

De este modo, y manteniendo todos los demás parámetros invariantes respecto del caso anterior, se obtienen las siguientes tensiones equivalentes de *Von Mises* máximas:

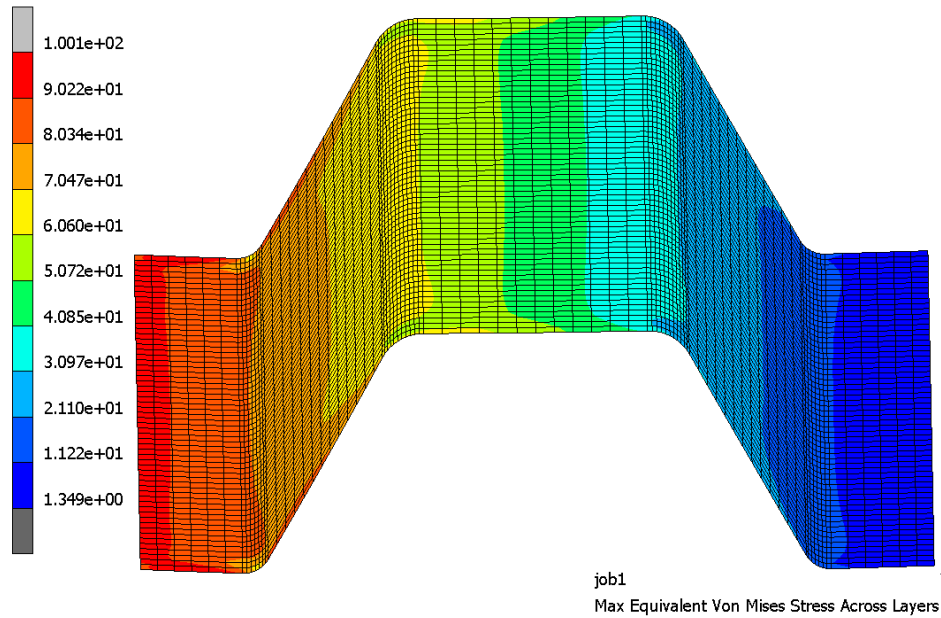


Figura 3.77: Tensiones de *Von Mises* máximas con mallado uniforme

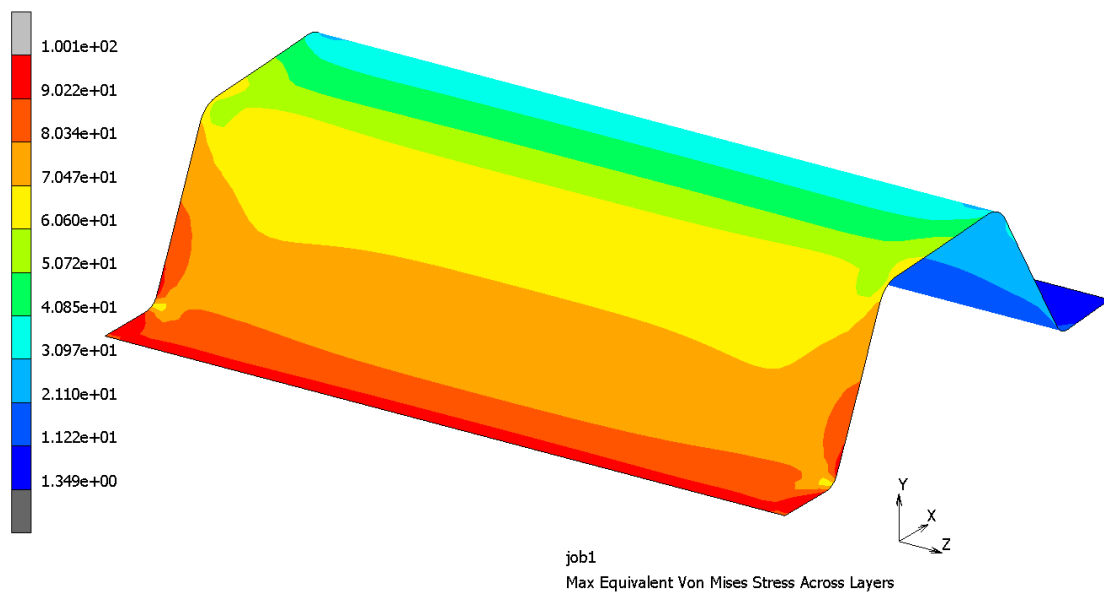


Figura 3.78: Tensiones de *Von Mises* máximas en el lado de apoyo con malla uniforme

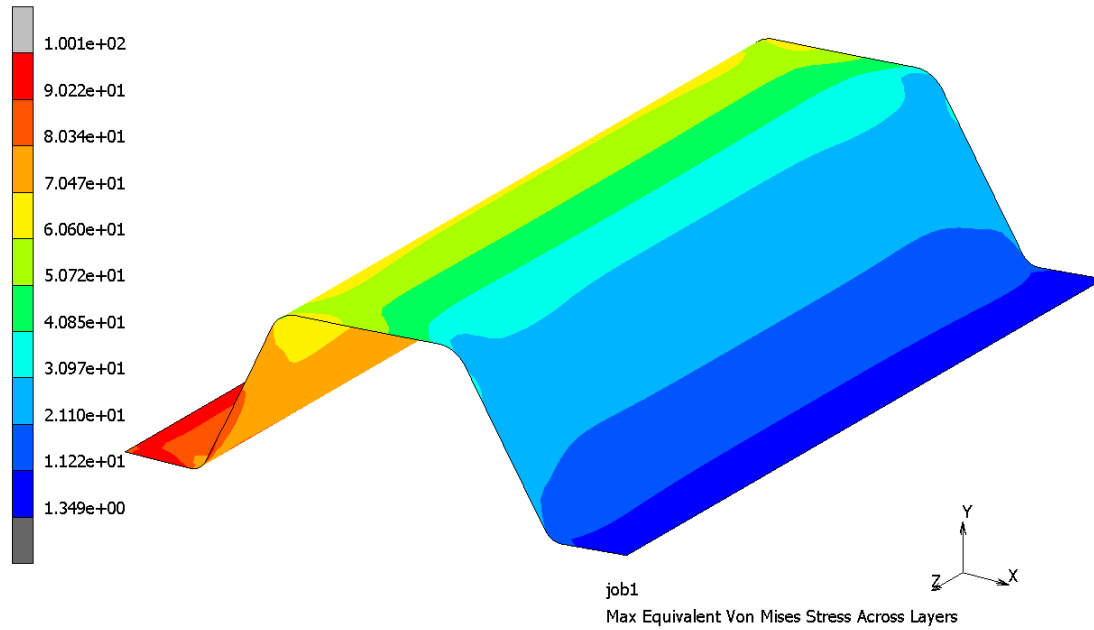


Figura 3.79: Tensiones de *Von Mises* máximas en el lado de la fuerza con malla uniforme

Como se puede observar, los valores de tensión obtenidos son muy similares a los resultados del mallado anterior, siendo ahora de 100,1 MPa, por lo que podemos considerar como aceptables ambos valores obtenidos. De todos modos, se considera que este segundo mallado es mejor que el anterior por su uniformidad y regularidad.

Con los datos obtenidos, se calcula el coeficiente de seguridad con la relación entre el límite de elasticidad y la tensión equivalente de *Von Mises* máxima obtenida y se obtiene lo siguiente:

$$c.s_{Al} = \sigma_y / \sigma_{EcVMmax} = 250 / 100,1 = 2,498 \quad (3.7)$$

Además, los desplazamientos son los siguientes:

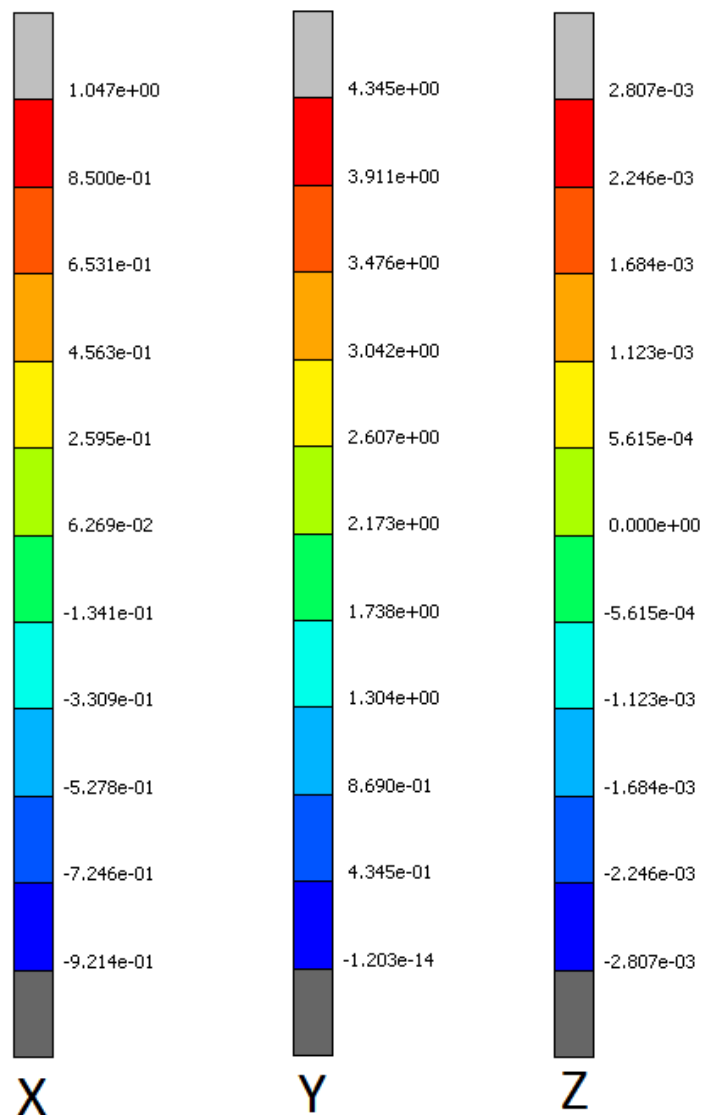


Figura 3.80: Valores de desplazamientos en los ejes X, Y, Z con malla uniforme

Se comprueba que los máximos desplazamientos siguen la misma estructura que en el caso anterior, contando con unos desplazamientos de aproximadamente 4 mm en el eje Y, siendo el que más desplazamientos experimenta, seguido del eje X, que cuenta con unos desplazamientos de 0,85 mm y finalmente el eje Z con unos desplazamientos despreciables frente a los otros dos.

En la Figura 3.81 se pueden observar, de manera amplificada, los movimientos resultantes en el plano XY.

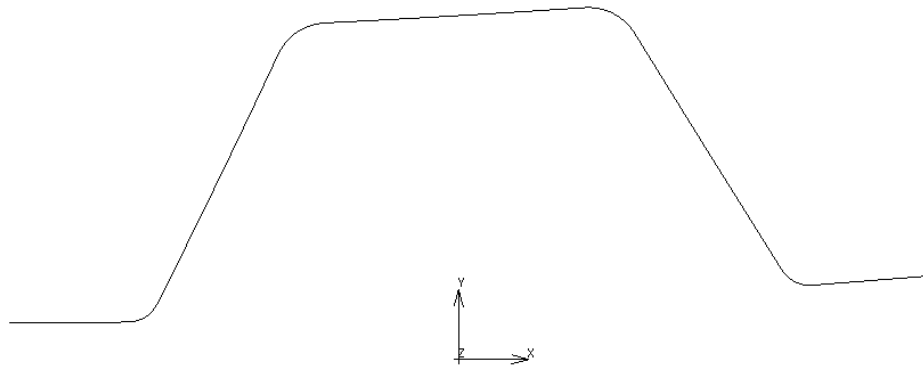


Figura 3.81: Desplazamientos en el plano XY con malla uniforme

Ensayo de la pieza en material compuesto con fibra de vidrio

Por último, se va a analizar la pieza pero con material compuesto con un 60 % de contenido en fibra de vidrio larga.

En este caso, se utiliza el mallado uniforme anterior, que se puede observar en las Figuras 3.71 y 3.72. Se toma esta en lugar de la no-uniforme ya que se considera que los resultados van a tener un carácter más regular al tener todos los elementos las mismas formas variando únicamente en su tamaño.

Las cargas aplicadas y los apoyos permanecen igualmente invariantes.

Para este ensayo es necesario crear el material compuesto de estudio. Para ello, en primer lugar hay que crear el material con el que contaría una capa del compuesto, es decir, con las características del conjunto fibra-matriz en una única dirección a partir de las propiedades tomadas y que se encuentran en la Figura 3.6. De este modo, se toma como base un material ortótropo y se dan los siguientes valores:

Material Properties

Name: fibramatriz_monodireccion
Type: standard

Region Type: Finite Stiffness
Data Method: Entered Values

General Properties
Mass Density: 1780 [Table]
Design Sensitivity/Optimization

Other Properties
Show Properties: Structural
Type: Elastic-Plastic Orthotropic
Shell/Plane Stress Elements: ☒ Update Thickness

Young's Moduli
E1: 44800 [Table]
E2: 11270 [Table]
E3: 11270 [Table]

Poisson's Ratios
Nu12: 0.28 [Table]
Nu23: 0.28 [Table]
Nu31: 0.28 [Table]

Shear Moduli
G12: 4860 [Table]
G23: 4440 [Table]
G31: 4860 [Table]

☐ Viscoelasticity
☒ Damage Effects
☐ Damping
☐ Plasticity
☐ Thermal Expansion
☐ Forming Limit
☐ Creep
☐ Cure Shrinkage

Entities
Elements: Add Rem 0
Solid / Sheet / Wire Bodies: Add Rem 0

OK

Figura 3.82: Propiedades para una capa monodireccional

Se considera que la dirección 1 coincide con la dirección del eje X y toma la dirección de la fibra, la dirección 2 coincide con el eje Y y toma la dirección perpendicular a la fibra y longitudinal de la pieza y finalmente la dirección 3 coincide con el eje Z. Estas direcciones pueden observarse en la Figura 3.83.

Con esto, se sabe que los esfuerzos en la dirección 1 va a depender en gran medida de las propiedades de la fibra y las cargas en las direcciones 2 y 3 van a ser soportadas en

su mayor parte, por la matriz.

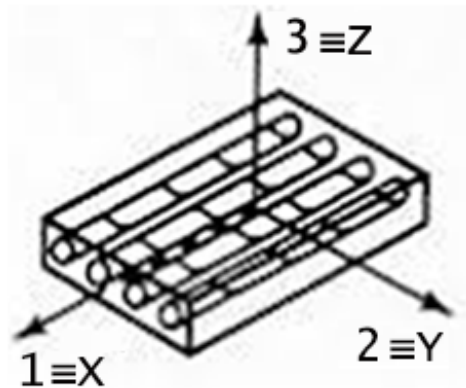


Figura 3.83: Ejes considerados en el material compuesto

A continuación, en este mismo material creado se seleccionan los criterios de fallo que se van a aplicar para el estudio de la pieza en el apartado de efectos de daño. En esta ocasión, se toma como criterio principal el criterio de Tsai-Wu y como criterio secundario el de Hashin.

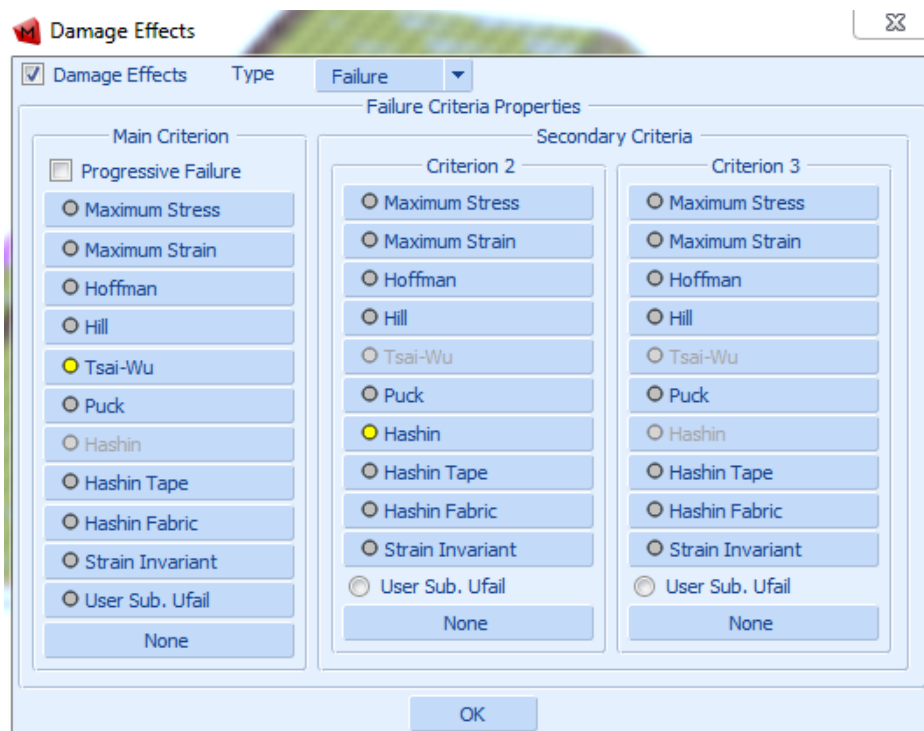


Figura 3.84: Criterios de fallo seleccionados

Para obtener resultados para estos criterios, es necesario introducir ciertos valores. Estos valores tomados pueden verse en las Figuras 3.85 y 3.86.

Parameter	Value	Action
Max Tensile Stress X	1200	Table
Max Compressive Stress X	200	Table
Max Tensile Stress Y	60	Table
Max Compressive Stress Y	200	Table
Max Tensile Stress Z	40	Table
Max Compressive Stress Z	200	Table
Max Shear Stress XY	30	Table
Max Shear Stress YZ	150	Table
Max Shear Stress ZX	150	Table
Failure Index	1	
Interactive Strength Tensor XY	0	Table
Interactive Strength Tensor YZ	0	Table
Interactive Strength Tensor ZX	0	Table

Figura 3.85: Valores tomados para el criterio de Tsai-Wu

Parameter	Value	Action
Max Fiber Tension	1200	Table
Max Fiber Compression	200	Table
Max Matrix Tension	60	Table
Max Matrix Compression	200	Table
Layer Shear Strength	30	Table
Transverse Shear Strength	150	Table

Figura 3.86: Valores tomados para el criterio de Hashin

Teniendo toda la información necesaria para una capa de material, se procede a crear el laminado del material compuesto de estudio. Para ello, se introduce el material

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL UTILLAJE

monodireccional creado anteriormente en múltiples ocasiones indicando en cada caso la dirección del mismo como se puede observar en la Figura 3.87.

The dialog box 'Material Properties' is shown with the following details:

- Name:** laminado
- Type:** composite
- Region Type:** Finite Stiffness
- Data Method:** Entered Values
- General Properties:**
 - Reference Plane:** 0
 - Single Layer:** Append, Insert, Copy, Remove, Material
 - Layer Range:** Copy, Remove
 - Layers:** 6
 - Settings:** Auto ID, Relative Thickness
- Table of Layers:**

Index	ID	Material	Thickness	Angle
1	1	fibramatriz_monodireccion	16.6667	% 0
2	2	fibramatriz_monodireccion	16.6667	% 45
3	3	fibramatriz_monodireccion	16.6667	% -45
4	4	fibramatriz_monodireccion	16.6667	% -45
5	5	fibramatriz_monodireccion	16.6667	% 45
6	6	fibramatriz_monodireccion	16.6667	% 0
- Sum:** 100 %
- Available Materials:** fibramatriz_monodireccion
- Other Properties:**
 - Show Properties:** Structural
 - Shell Composite Integration Method:** Default
 - ☐ Interlaminar Shear Bond Index
 - ☐ Damping
- Entities:**
 - Elements:** Add, Rem, 5160
 - Solid / Sheet / Wire Bodies:** Add, Rem, 0
- OK** button

Figura 3.87: Propiedades del laminado del material

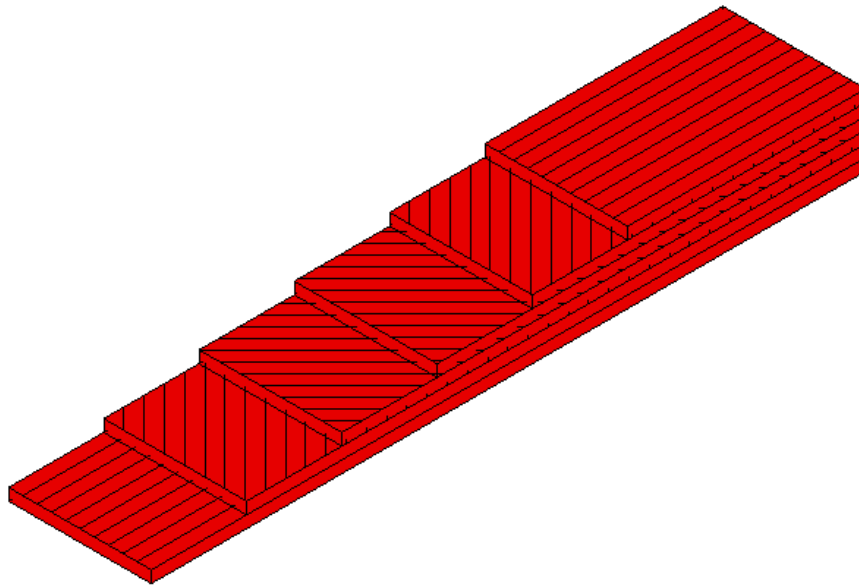


Figura 3.88: Visualización del laminado del material

Como se puede observar, se ha tomado un laminado $[0/\pm 45]_s$. Se ha tomado este ya que se quiere que las fibras sean capaces de soportar algo de carga en la dirección 2 y 3 (o Y y Z, respectivamente), pero se desea que en la dirección que más soporte sea en la 1 (o X), por lo que en todas las capas se tiene cierta componente en dirección 1 y dos de ellas trabajan únicamente en dicha dirección.

Además, se ha tomado un laminado simétrico para que no se den las tensiones internas que se producen cuando éste no es simétrico respecto del plano central del mismo y que pueden ocasionar defectos en pieza y flexiones no deseadas que hagan que no se pueda obtener la forma deseada para la pieza.

Es este laminado el que se utiliza como material para todos los elementos presentes en la simulación y se estipula en el modelo que la dirección 1 va a ser coincidente con el eje X como se ve en la Figura 3.89 y 3.90.

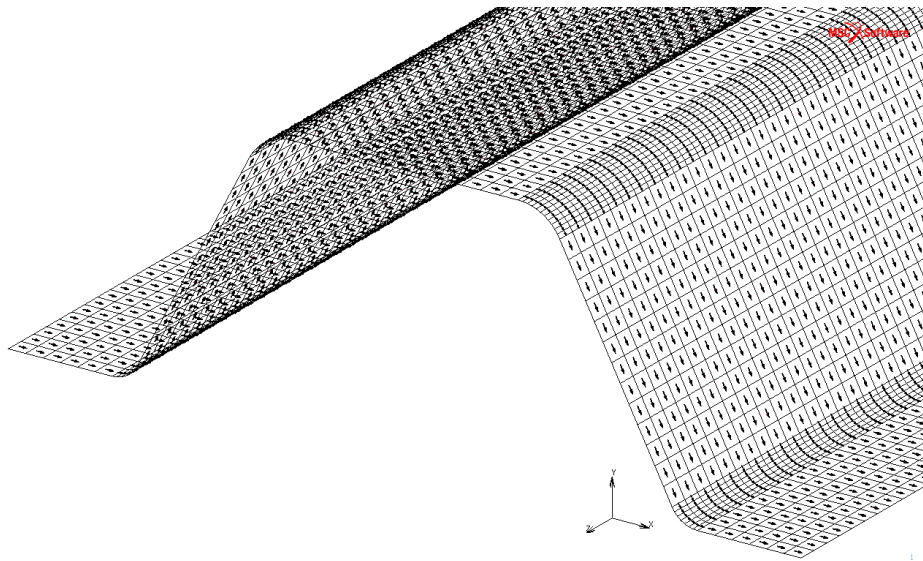


Figura 3.89: Dirección 1 del laminado

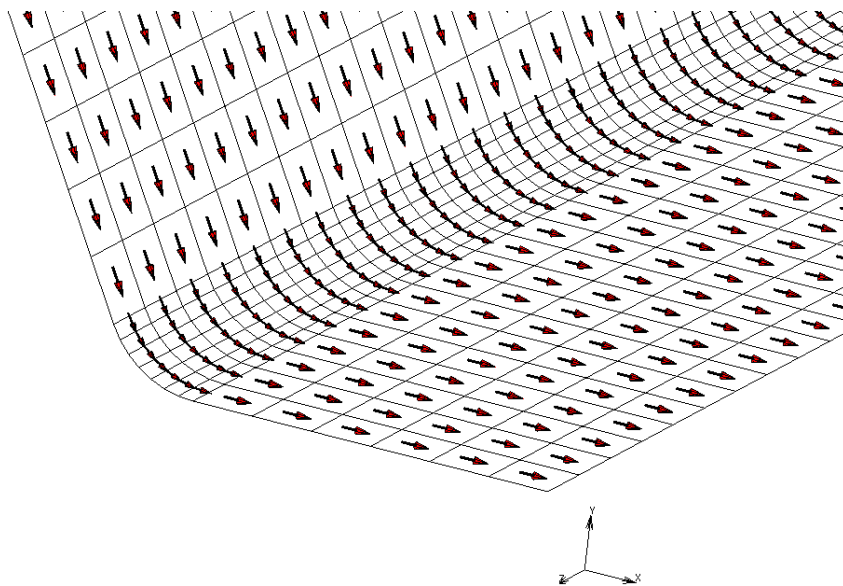


Figura 3.90: Detalle de la dirección 1 del laminado en radios de acuerdo

En esta ocasión también se utiliza un único paso de cálculo y se seleccionan los siguientes resultados a obtener:

Quantity	Layers		
<input checked="" type="checkbox"/> 1st Failure Index	Max & Min	▼	Clr
<input checked="" type="checkbox"/> 2nd Failure Index	Default	▼	Clr
<input checked="" type="checkbox"/> 3rd Failure Index	Default	▼	Clr
<input checked="" type="checkbox"/> 4th Failure Index	Default	▼	Clr
<input checked="" type="checkbox"/> 5th Failure Index	Default	▼	Clr
<input checked="" type="checkbox"/> 6th Failure Index	Max & Min	▼	Clr

Figura 3.91: Resultados a obtener en la simulación

En esta ocasión, no se selecciona la tensión equivalente de *Von Mises* ya que en materiales compuestos no tiene sentido su aplicación.

Como se puede observar, se han seleccionado 6 índices de fallo que corresponden con los criterios de fallo seleccionados anteriormente. Los índices de fallo son la manera que tiene el programa para comparar los parámetros de los diferentes criterios con las tensiones que se dan en la pieza, generando y resolviendo ecuaciones con los valores máximos obtenidos y comparando las tensiones. Para obtener los resultados deseados, hay que marcar tantos índices como sea necesario para cubrir todos los criterios que haya en función de cuántos índices se estudien con cada uno de ellos.

En este caso, el primer índice corresponde al criterio de fallo de Tsai-Wu ya que en este únicamente se hace una comparación, aplicando la ecuación 1.4. Al estar buscando valores máximos, ya que son los más críticos, se selecciona la opción Max & Min.

Los otros cinco índices corresponden al criterio de Hashin, y dentro de esos seis, es el quinto de ellos (sexto índice de fallo total) el que indica el máximo buscado, por lo que se selecciona la opción Max & Min en él.

Los índices obtenidos deben encontrarse siempre por debajo de 1 para que la pieza aguante y si se toma el valor máximo y se divide a la unidad por él, se obtiene el factor de seguridad con el que cuenta la pieza.

Con todo esto, se obtienen los siguientes valores para los índices:

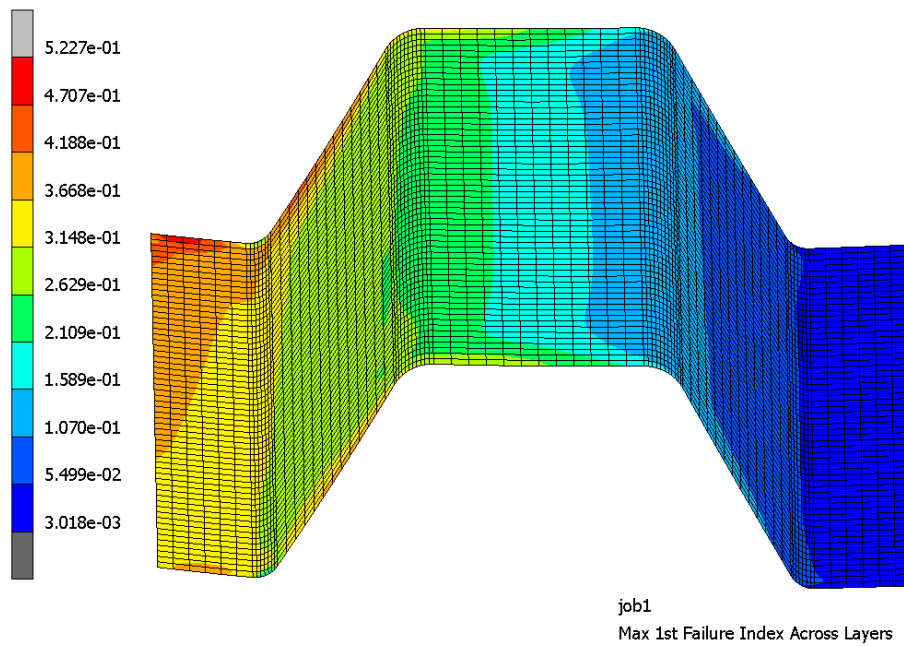


Figura 3.92: Índice de fallo 1. Máximo de Tsai-Wu

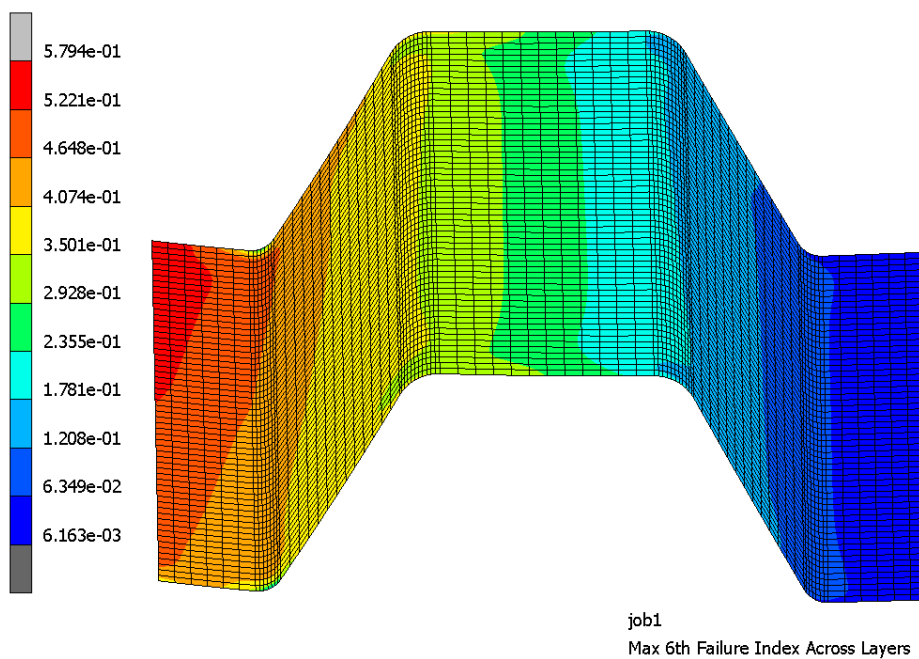


Figura 3.93: Índice de fallo 6. Máximo de Hashin

Observando los resultados obtenidos, se comprueba que en ninguno de los dos casos se

obtienen valores repartidos de manera uniforme, sino que las tensiones mayores, y por tanto los índices mayores, se concentran en la zona trasera izquierda de la pieza. En este caso, esta situación podría deberse a la naturaleza ortótropa del material utilizado, provocando una desviación de las tensiones en función de como están orientadas las diferentes láminas a partir de las cuales está formada la pieza.

Además, se puede observar que el criterio de Hashin es un criterio más restrictivo que el de Tsai-Wu, ya que aparece una superficie mayor en la cual se alcanzan los valores máximos.

A pesar de esto, se comprueba que los índices máximos obtenidos son bastante similares, teniendo con el criterio de Tsai-Wu un índice máximo de $5,227 \cdot 10^{-1}$, mientras que el máximo con Hashin se encuentra en $5,794 \cdot 10^{-1}$.

De esta manera, si se calculan los coeficientes de seguridad para cada uno de los dos criterios, dividiendo la unidad entre el índice máximo obtenido, se tiene que para el de Tsai-Wu el coeficiente de seguridad es el obtenido en la Ecuación 3.8 y para el de Hashin el coeficiente de seguridad es el obtenido en la Ecuación 3.9.

$$c.S_{tsai-Wu} = 1/i_{max} = 1/5,227 \cdot 10^{-1} = 1,9131 \quad (3.8)$$

$$c.S_{Hashin} = 1/i_{max} = 1/5,794 \cdot 10^{-1} = 1,7259 \quad (3.9)$$

Se observa que los coeficientes de seguridad varían en, aproximadamente, 0,2 dependiendo del criterio utilizado. Se consideran ambos aceptables.

Si se comparan los coeficientes de seguridad obtenidos con el aluminio frente a los obtenidos en material compuesto, se observa que son significativamente menores en este último, habiendo una diferencia de aproximadamente 1.

A pesar de esto, se consideran unos valores aceptables ya que en todos los casos son mayores que uno, lo que asegura que la pieza no va a fallar bajo la tensión aplicada. Además, cuenta con cierto margen, lo que conlleva que podría soportar unas cargas considerablemente mayores a las utilizadas en esta simulación.

Además, se obtienen los siguientes desplazamientos:

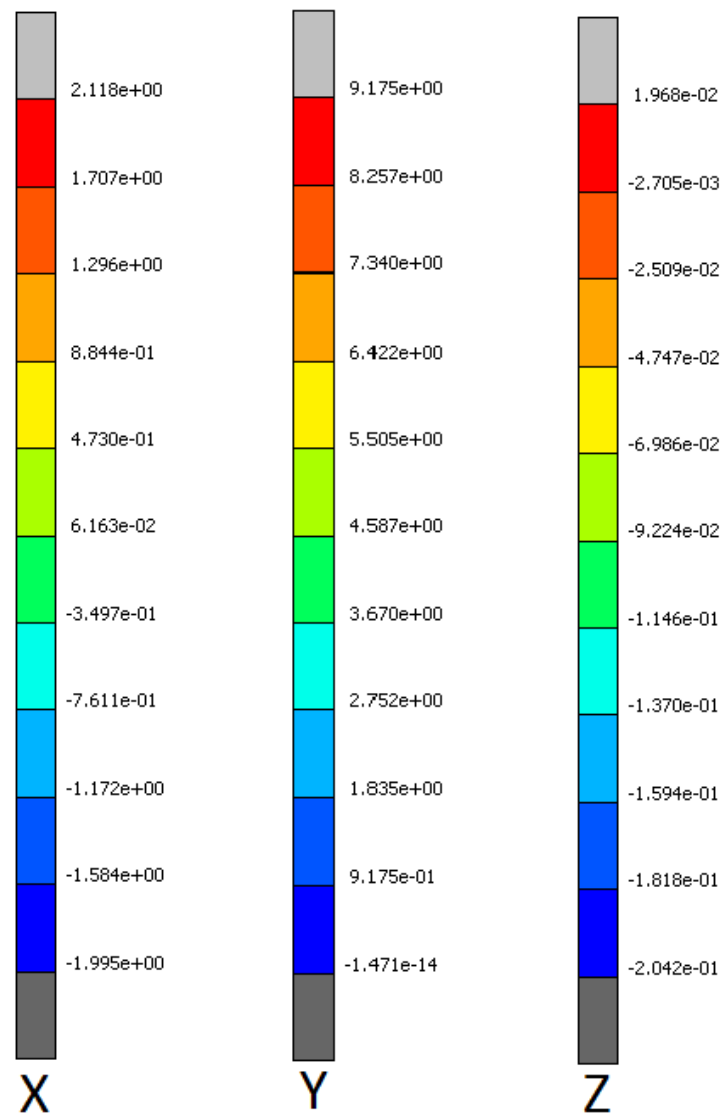


Figura 3.94: Valores de desplazamientos en los ejes X, Y, Z en material compuesto

Se comprueba que los máximos desplazamientos siguen la misma estructura que los casos anteriores, contando con unos desplazamientos máximos de aproximadamente 8,25 mm en el eje Y, siendo el que más desplazamientos experimenta, seguido del eje X, que cuenta con unos desplazamientos de 1,7 mm y finalmente el eje Z con unos desplazamientos despreciables frente al resto.

En la Figura 3.95 se pueden observar, de manera amplificada, los movimientos resultantes en el plano XY.

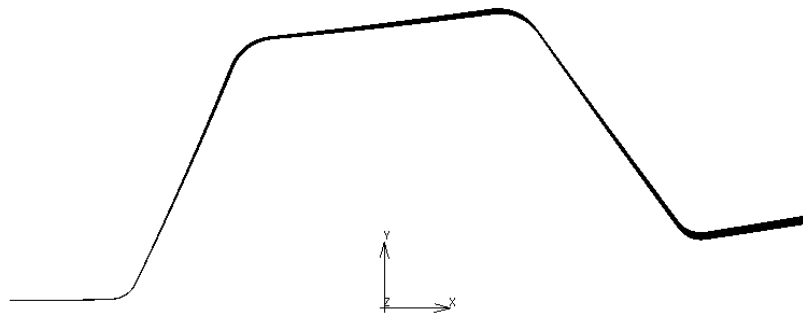


Figura 3.95: Desplazamientos en el plano XY con material compuesto

Si se comparan estos desplazamientos obtenidos con los que aparecen con la pieza fabricada en aluminio, se observa que son mucho mayores, llegando a casi duplicarlos. Además, aparece un giro que en el material isótropo no aparecía, esto es debido a la anisotropía presente en los materiales compuestos que provoca un comportamiento menos lineal que en los materiales isótropos.

4 Conclusiones y líneas de futuro

La realización de este proyecto ha ayudado a aplicar y aumentar los conocimientos adquiridos durante el grado, siendo muy enriquecedor a pesar de las circunstancias acaecidas este curso, con el cese de la colaboración por parte de la empresa.

Tras las comprobaciones realizadas al molde en los ensayos, se cree conveniente aumentar el espesor resultante entre la zona externa del molde y los orificios para las resistencias para evitar, de este modo, concentraciones de tensiones que puedan convertirse en críticas para la pieza.

Se ve también interesante la aplicación de ciertos tratamientos superficiales para mejorar sus propiedades.

Del mismo modo, se comprueba que hay ciertas diferencias de comportamiento entre la pieza fabricada en aluminio, material isótropo, frente a la fabricada en material compuesto, material ortótropo, apreciándose un carácter menos lineal en el segundo caso debido a la presencia de capas diferenciadas en su estructura.

Además, se aprecian unas mayores deformaciones en el material compuesto provocadas por una menor rigidez estructural frente al metal.

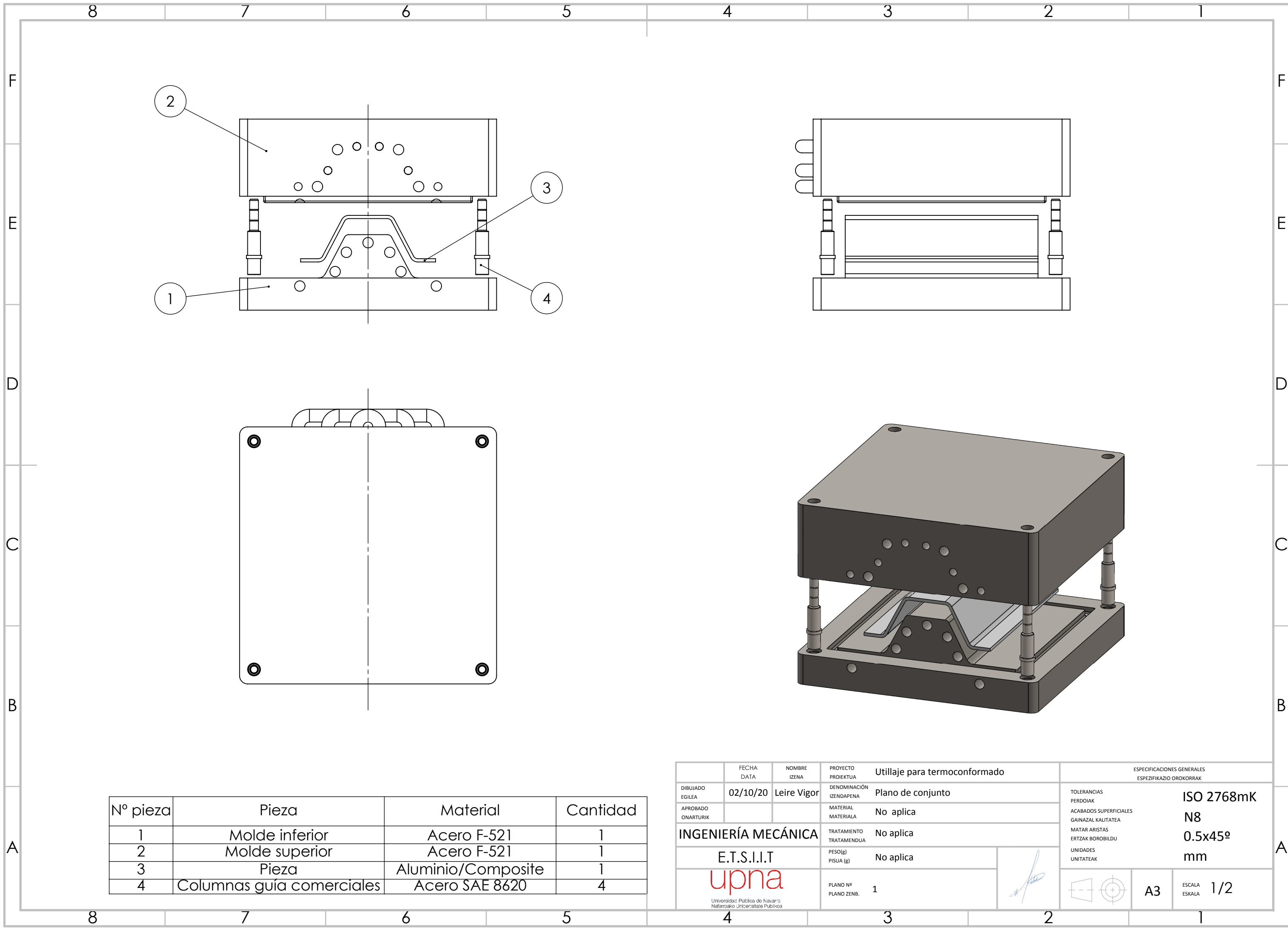
También se obtienen unos coeficientes de seguridad en todo momento mayores que 1, por lo que se considera que la pieza aguantará los esfuerzos a los que se encontraría sometida independientemente del material en el que se fabrique.

Se cree interesante seguir con este proyecto, efectuando todas las mejoras comentadas anteriormente y dando una mayor importancia a la variación de temperatura durante el proceso, lo que acercaría más la simulación a la realidad ya que en un proceso de termoconformado real, se dan ciertas alteraciones en la temperatura aunque se pretende que ésta sea lo más constante y cercana a la temperatura óptima posible.



5 Anexo A. Planos

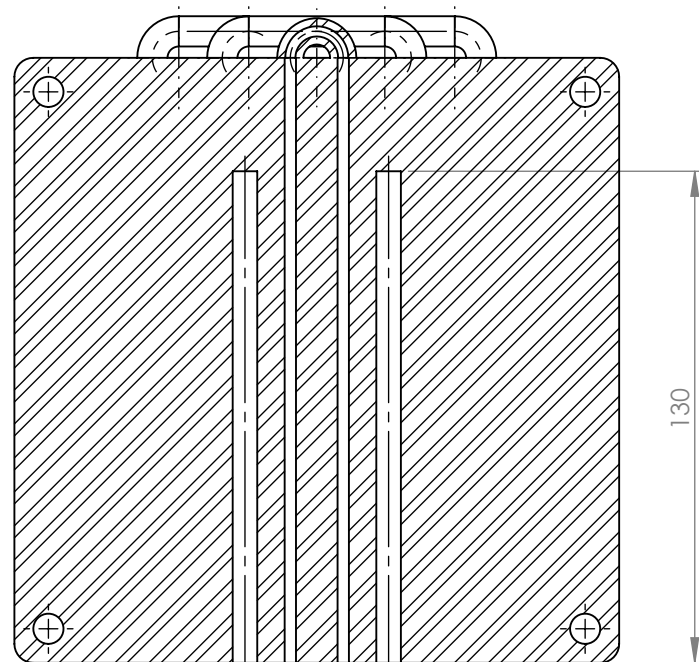
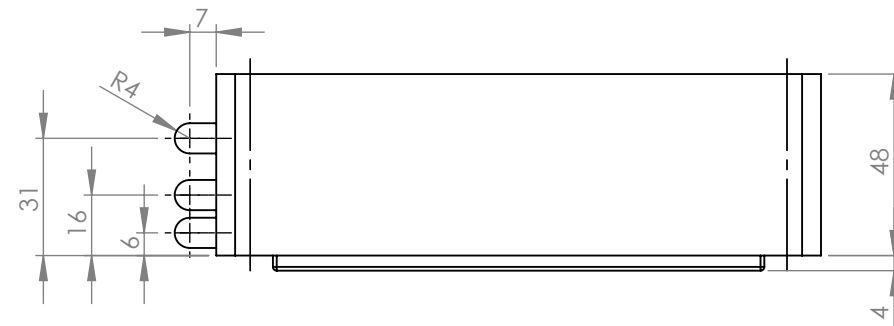
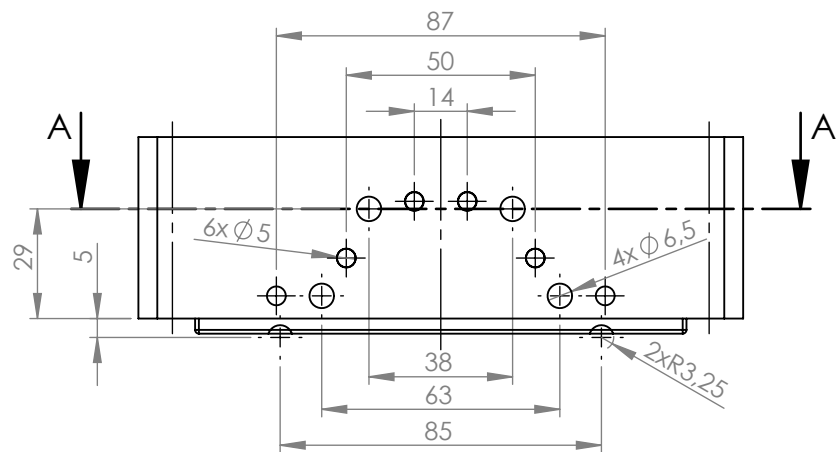
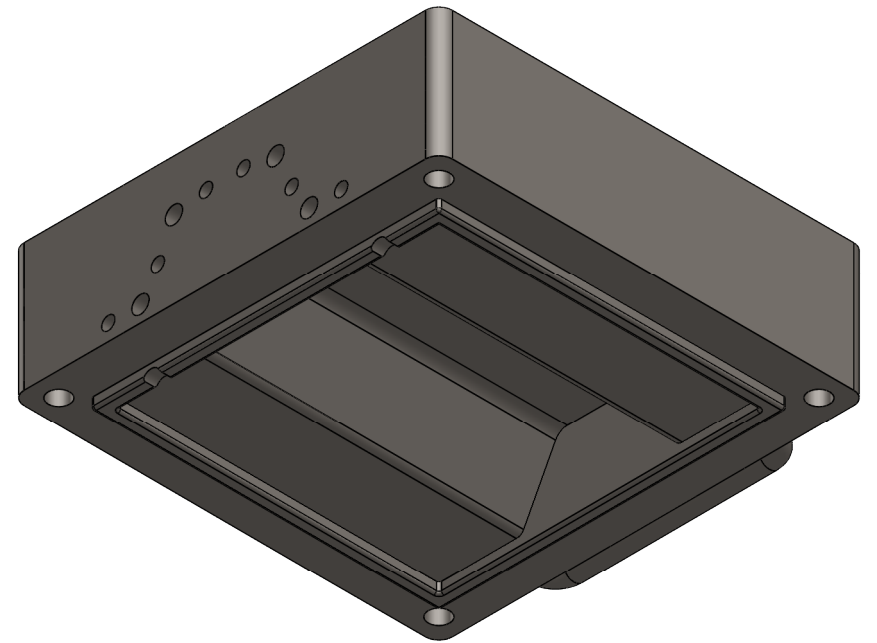
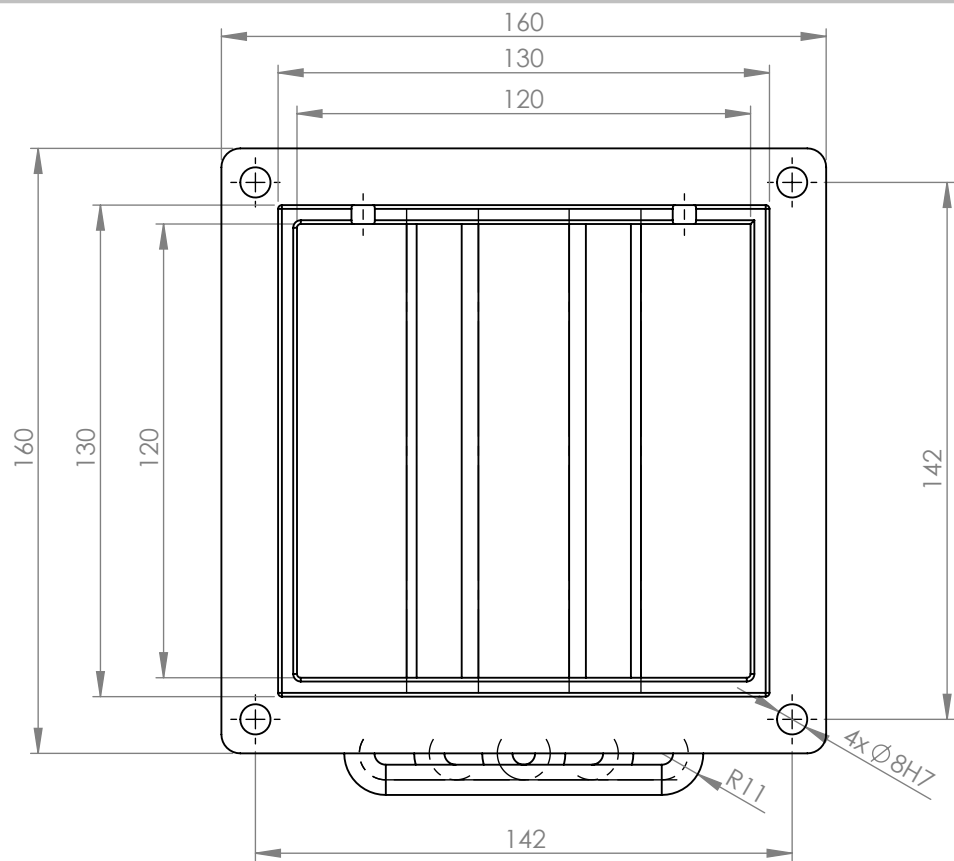
Se muestran el plano de conjunto y todos los planos de piezas no comerciales presentes.

- Plano 1. Plano de conjunto.
- Plano 2. Molde inferior.
- Plano 3. Molde superior.
- Plano 4. Pieza.



Nº pieza	Pieza	Material	Cantidad
1	Molde inferior	Acero F-521	1
2	Molde superior	Acero F-521	1
3	Pieza	Aluminio/Composite	1
4	Columnas guía comerciales	Acero SAE 8620	4

	FECHA DATA	NOMBRE IZENA	PROYECTO PROIEKTUA	Utlillaje para termoconformado		ESPECIFICACIONES GENERALES ESPEZIFIKAZIO OROKORRAK		
DIBUJADO EGILEA	02/10/20	Leire Vigor	DENOMINACIÓN IZENDAPENA	Plano de conjunto		TOLERANCIAS PERDOIAK ACABADOS SUPERFICIALES GAINAZAL KALITATEA MATAR ARISTAS ERTZAK BOROBILOU UNIDADES UNITATEAK ISO 2768mK N8 0.5x45º mm		
APROBADO ONARTURIK			MATERIAL MATERIALA	No aplica				
INGENIERÍA MECÁNICA			TRATAMIENTO TRATAMENDUA	No aplica				
E.T.S.I.I.T			PESO(g) PISUA (g)	No aplica				
<div>upna</div> <div>Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa</div>			PLANO Nº PLANO ZENB.	1			A3	ESCALA ESKALA 1/2

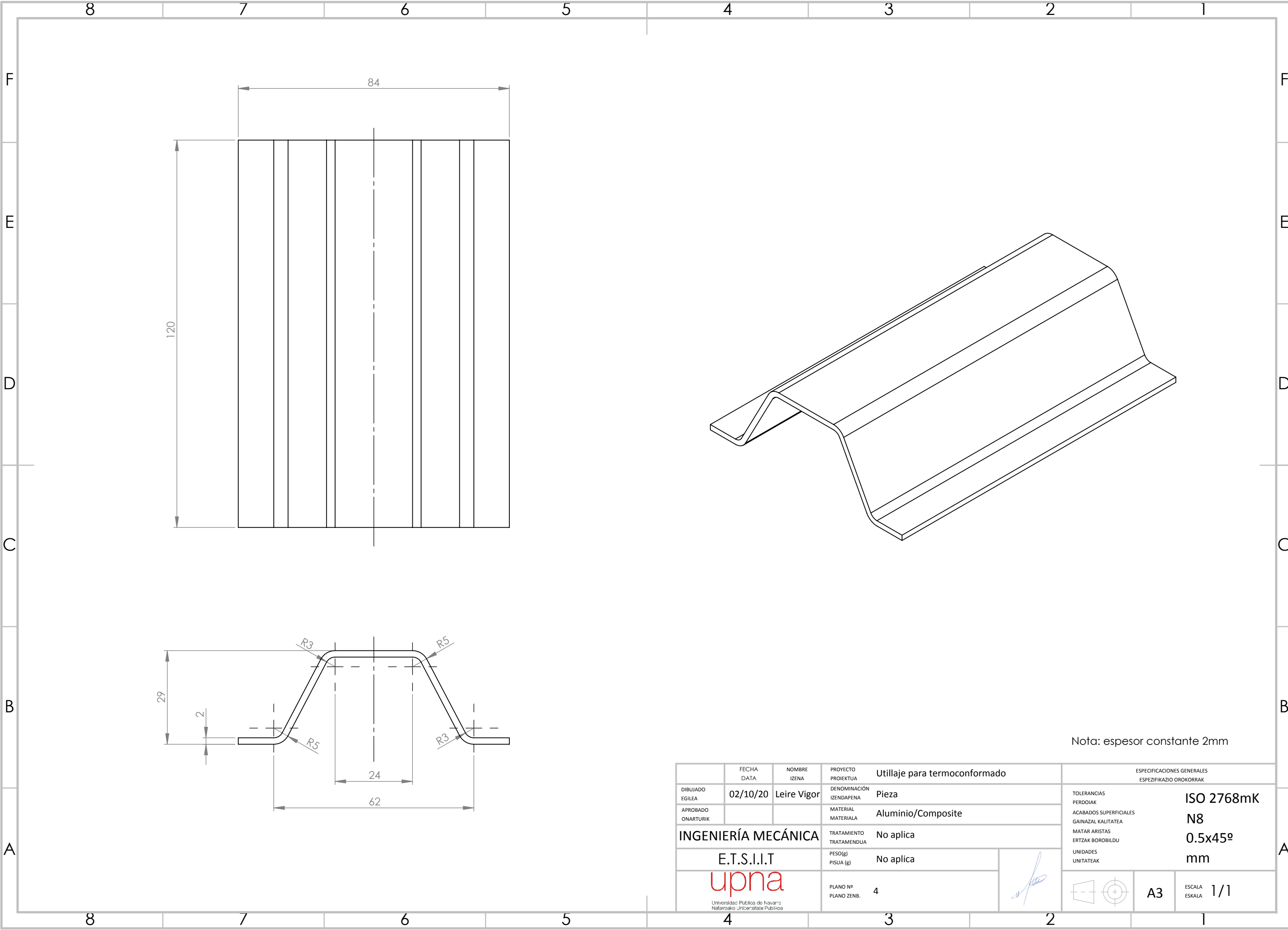


SECCIÓN A-A

Radios no acotados: 1mm

ESPECIFICACIONES GENERALES ESPEZIFIKAZIO OROKORRAK			
TOLERANCIAS PERDOIAK	ISO 2768mK		
ACABADOS SUPERFICIALES	N8		
GAINAZAL KALITATEA	0.5x45º		
MATAR ARISTAS	mm		
ERTZAK BOROBILOU			
UNIDADES UNITATEAK			
ESCALA ESKALA	A3	1/2	

FECHA DATA	02/10/20	NOMBRE IZENA	Leire Vigor	PROYECTO PROIEKTUA	Utillaje para termoconformado
DIBUJADO EGILEA				DENOMINACIÓN IZENDAPENA	Molde superior
APROBADO ONARTURIK				MATERIAL MATERIALA	Acero F-522
INGENIERÍA MECÁNICA				TRATAMIENTO TRATAMENDUA	No aplica
E.T.S.I.I.T				PESO(g)	8274,85 g
upna				PISUA (g)	
Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa				PLANO Nº PLANO ZENB.	3



Nota: espesor constante 2mm

	FECHA DATA	NOMBRE IZENA	PROYECTO PROIEKTUA	Utilaje para termoconformado		ESPECIFICACIONES GENERALES ESPEZIFIKAZIO OROKORRAK		
DIBUJADO EGILEA	02/10/20	Leire Vigor	DENOMINACIÓN IZENDAPENA	Pieza		TOLERANCIAS PERDOIAK ACABADOS SUPERFICIALES GAINAZAL KALITATEA MATAR ARISTAS ERTZAK BOROBILOU UNIDADES UNITATEAK	ISO 2768mK	
APROBADO ONARTURIK			MATERIAL MATERIALA	Aluminio/Composite			N8	
INGENIERÍA MECÁNICA			TRATAMIENTO TRATAMENDUA	No aplica			0.5x45º	
E.T.S.I.I.T			PESO(g) PISUA (g)	No aplica			mm	
<div>upna</div> <div>Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa</div>			PLANO Nº PLANO ZENB.	4			A3	ESCALA ESKALA 1/1

Bibliografía

- [1] I. Askargorta, A. Salaberria, G. Hoyos, A. Rekondo, H. Grande, M. Landa, X. Pavón y D. Ramos, «Termoconformado de composites termoestables fabricados por pultrusión», *Materiales Compuestos*, vol. 3, n.º 3, págs. 74-79, 2019.
- [2] E. Castillo, «Análisis de criterios de fallo para materiales compuestos», Tesis de lic., Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño de la Universidad Politécnica de Valencia, 2016.
- [3] I. M. Marín, «Análisis de falla de un casco de canoa single construida en sistema sandwich prf/honeycomb/prf mediante un software de elementos finitos», Tesis de lic., Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Escuela de Ingeniería Naval de la Universidad Austral de Chile, 2008.
- [4] N. Markaide, A. R. de Luzuriaga, G. Hoyos, A. Rekondo y H. Grande, «Composites termoestables reprocesables, reparables y reciclables», *Materiales Compuestos*, vol. 2, n.º 1, 2018.
- [5] M. Molinier, «Análisis de los criterios de falla aplicados a los laminados compuestos», Tesis de lic., Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires.
- [6] L. S. Arias y L. Vanegas, «Falla de los materiales compuestos laminados», *Scientia et Technica Año X*, n.º 25, págs. 113-118, 2004.
- [7] D. Systèmes. (2020). SolidWorks. Authentic design experience, dirección: <https://www.3ds.com/products-services/solidworks/>. (accessed: 04/06/2020).
- [8] MSC. (2020). Marc. Advanced Nonlinear Simulation Solution, dirección: <https://www.mssoftware.com/product/marc>. (accessed: 04/06/2020).
- [9] V. Tita, J. de Carvalho y J. Lirani, «Theoretical and Experimental Dynamic Analysis of Fiber Reinforced Composite Beams», *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering Vol. XXV*, n.º 3, págs. 306-310, 2003.